

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

KATEDRA ELEKTROMECHANIKY A VÝKONOVÉ ELEKTRONIKY

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Budicí systémy synchronních strojů

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
Fakulta elektrotechnická
Akademický rok: 2011/2012

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Jan DIVIŠ**
Osobní číslo: **E08B0058P**
Studijní program: **B2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Elektrotechnika a energetika**
Název tématu: **Budicí systémy synchronních strojů**
Zadávající katedra: **Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky**

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

1. Základní vlastnosti synchronních strojů.
2. Přehled budících soustav.
3. Porovnání jednotlivých budících soustav.
4. Návrh a dimenzování budicí soustavy.




Rozsah grafických prací: podle doporučení vedoucího
Rozsah pracovní zprávy: 20 - 30 stran
Forma zpracování bakalářské práce: tištěná/elektronická
Seznam odborné literatury:


1. Určí vedoucí práce.

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Marek Hořan**
Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky

Datum zadání bakalářské práce: **17. října 2011**
Termín odevzdání bakalářské práce: **3. června 2012**


Doc. Ing. Jiří Hammerbauer, Ph.D.
děkan




Prof. Ing. Václav Kůs, CSc.
vedoucí katedry

V Plzni dne 17. října 2011

Anotace

Tato bakalářská práce se zabývá budicími soustavami synchronních strojů a jejich navrhováním. Na začátku práce je popsána konstrukce synchronního stroje a jeho provozní stavy. V druhé části jsou rozděleny a popsány jednotlivé budicí soustavy a jejich funkce. V poslední části je popsán teoretický postup při navrhování usměřovače pro budicí soustavu a pro názornost je uveden i jeden konkrétní případ.

Klíčová slova

budicí soustava, synchronní stroj, usměřovač, polovodičová součástka, ztrátový výkon, chlazení

Abstract

This bachelor thesis deals with excitations systems of synchronous machine and their projecting. At the beginning of thesis are described constructions of synchronous machine and their operating conditions. At the second part are allocated and described excitation systems and their function. At the last part are described theoretical method projecting of rectifier for excitation systems and for illustration are instating one specific example.

Key words

excitation system, synchronous machine, rectifier, semiconductor gadget, power losing, cooling

Prohlášení

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě bakalářskou práci, zpracovanou na závěr bakalářského studia na Fakultě elektrotechnické Západočeské univerzity v Plzni.

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který je součástí této bakalářské práce.

V Plzni dne 6.6.2012

Jan Diviš

.....

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu mé bakalářské práce Ing. Marku Hořanovi za cenné profesionální rady, připomínky a metodické vedení práce, které mi pomohly k vypracování bakalářské práce.

Obsah

Obsah.....	8
Seznam použitých symbolů a zkratk	10
Úvod	12
1. Základní vlastnosti synchronních strojů.....	13
1.1. Konstrukce synchronních strojů.....	13
1.1.1. Stroje s hladkým rotorem	14
1.1.2. Stroje s vyniklými póly	14
1.2. Provozní stavy synchronního stroje	15
1.2.1. Samostatně pracující synchronní alternátor	15
1.2.2. Synchronní alternátor napájející energetickou síť.....	15
1.2.3. Synchronní motor.....	16
1.2.4. Synchronní kompenzátor.....	18
2. Budicí soustavy synchronních strojů.....	19
2.1. Kartáčové budicí soustavy	20
2.1.1. Budicí soustava s rotačním budičem.....	20
2.1.2. Budicí soustava s neřízeným usměřňovačem.....	21
2.1.3. Budicí soustava s řízeným usměřňovačem.....	21
2.1.4. Kompaundační budicí soustava.....	22
2.2. Bezkartáčové budicí soustavy	23
2.2.1. Budicí soustava se střídavým budičem a rotujícím usměřňovačem.....	23
2.2.2. Budicí soustava s rotačním transformátorem a diodovým usměřňovačem.....	24
2.2.3. Budicí soustava s budičem s protiběžným polem	25
3. Použití budicích soustav	26
4. Návrh budicí soustavy	27
4.1. Volba typového proudu součástky	27
4.2. Napět'ová zatížitelnost součástky	32

4.3. Kontrola výsledků pomocí softwaru	33
Závěr.....	35
Seznam použité literatury.....	36
Seznam příloh.....	37
Přílohy	38

Seznam použitých symbolů a zkratek

Symbol	Jednotka	Název
U_{bs}	V	stropní napětí
K_s	-	poměrné stropní napětí
K_r	s^{-1}	odezva napětí
T	s	doba stropního buzení
T_o	s	doba odezvy napětí
R_d	Ω	předřadný odpor v obvodu dynamu
R_p	Ω	předřadný odpor
R_s	Ω	spouštěcí odpor
$\cos\varphi$	-	účinník
U_v	V	sdružené napětí
I_{dmax}	A	maximální proud zátěže
T_a	$^{\circ}C$	teplota okolí
u	V	okamžitá hodnota napětí na střídavé straně měniče
$I_{V(AV)}$	A	střední hodnota proudu součástkou
I_{Vef}	A	efektivní hodnota proudu součástkou
U_{TO}	V	prahové napětí
R_v	K/W	diferenciální odpor
T_{jmax}	$^{\circ}C$	maximální teplota čipu
T_j	$^{\circ}C$	teplota čipu
T_r	$^{\circ}C$	teplota chladiče
T_c	$^{\circ}C$	teplota základny
R_{th}	K/W	tepelný odpor
R_{thjc}	K/W	tepelný odpor cesty čip – základna
R_{thcr}	K/W	tepelný odpor cesty základna – chladič
R_{thra}	K/W	tepelný odpor cesty chladič - chladičím médiem
$P_{tot(AV)}$	W	střední hodnota totálního ztrátového výkonu
$P_{fw(AV)}$	W	střední hodnota ztrátového výkonu propustným proudem

$T_{c(AV)}$	$^{\circ}\text{C}$	střední hodnota teploty základny
C_{thc}	K/W	tepelná kapacita základny
C_{thj}	K/W	tepelná kapacita čipu
C_{thr}	K/W	tepelná kapacita chladiče
U_{RWM}	V	maximální pracovní napětí v závěrném směru
U_{DWM}	V	maximální pracovní napětí v blokovacím směru
U_{RRM}	V	opakovatelné špičkové závěrné napětí součástky
U_{DRM}	V	opakovatelné špičkové blokovací napětí tyristoru
V_{in}	V	vstupní napětí
I_{out}	A	proud zátěží
f_{in}	Hz	vstupní frekvence
K_U	-	koeficient bezpečnosti
B		budič
SM		synchronní motor
Q1,Q2		výkonový vypínač
K		spínací kontakt
T		transformátor
U		usměřňovač
Ri		regulátor budicího proudu
R_Q		regulátor jalového výkonu nebo $\cos\varphi$
C		kondenzátor
TL		reaktor
V		ventil
SB		střídavý budič
PO		přepět'ová ochrana

Úvod

Synchronní stroje se dnes ve většině případů používají pro výrobu elektrické energie a pracují tedy jako alternátory. V parních elektrárnách se používají rychloběžné turboalternátory s malým počtem pólů, ve vodních elektrárnách se naopak používají vícepólové pomaloběžné hydroalternátory. Pokud alternátor napájí energetickou síť, změnou jeho buzení se mění jalový výkon dodávaný do sítě. Někdy se můžeme setkat i s případem, že synchronní stroj pracuje jako motor. V takovém případě se buzení používá pro vtažení motoru do synchronismu. Budicí soustava je tedy nedílnou součástí synchronního stroje.

Dnes se používají různé druhy různých budicích soustav pro různé účely a je možno je dělit podle několika hledisek. Rozvoj polovodičové techniky a zvětšující se jednotkové výkony synchronních strojů způsobily, že točivé budiče byly nahrazeny statickými usměrňovači. Jisté problémy také způsobuje přenášení budicího proudu přes kartáče a sběrací kroužky. Tento problém se vyřešil použitím bezkartáčové budicí soustavy. Podrobnějším popisem budicích soustav se zabývá druhá část této práce.

Cílem této práce nebylo jen zmapovat druhy budicích soustav, ale také popsat navrzení a dimenzování budicí soustavy. Pro zjednodušení je v této práci popsán jen postup při navrhování usměrňovače, který je jak komentovaný, tak je doplněný o výpočet pro konkrétní zadané hodnoty.

1. Základní vlastnosti synchronních strojů

1.1. Konstrukce synchronních strojů

Synchronní stroje se vždy točí synchronními otáčkami, jak už z jejich názvu vyplývá. Mají jako většina točivých elektrických strojů dvě hlavní části. Těmito částmi jsou stator a rotor.

Stator synchronního stroje je stejný jako u asynchronního stroje. Je poskládán z plechů, které jsou navzájem od sebe izolovány a z drážek, ve kterých je uloženo trojfázové elektrické vinutí. Toto vinutí se obvykle spojuje do hvězdy. U vinutí velkých strojů, kde má vodič velký průřez a je vysoký, může dojít ke vzniku vířivých proudů a k efektům vytlačujícím proud k okraji vodičů. To má za následek vznik přídavných Jouleových ztrát. Dá se tomu zabránit rozdělením průřezu na dílčí vodiče, které se postupně prostřídají tak, aby i několikrát prošly od horní strany průřezu ke spodní straně a zpět.

Vzduchová mezera je u synchronních strojů daleko větší než u asynchronního motoru, protože synchronní stroje ze sítě neodebírají jalový výkon. Jalový výkon někdy mohou synchronní stroje do sítě i dodávat, v takovém případě mluvíme o synchronních kompenzátorech.

Rotor synchronního stroje většinou není složen z plechů, protože při běhu stroje sleduje točivé magnetické pole statoru a nevznikají v něm tak ztráty v železe. Může tedy být zhotoven z odlitku oceli. V rotoru je uloženo budicí vinutí, které je napájeno stejnosměrným budicím proudem. Nejčastějším zdrojem budicího proudu je stejnosměrné dynamo s paralelním buzením, dále se mohou používat i jiné zdroje stejnosměrného proudu. Ve většině případech se budicí proud do budicího vinutí přivádí přes kartáče a kroužky. V ojedinělých případech je buzení bezkartáčové.

Součástí rotoru je také tlumič, což je obdoba klece nakrátko u asynchronních motorů. Funkce tlumiče u synchronních strojů je potlačení kývání rotoru, u synchronních generátorů také slouží k omezení vlivu nesouměrné zátěže. U synchronních motorů může také tlumič sloužit při rozběhu k vytvoření asynchronního momentu.

Podle provedení rotoru můžeme synchronní stroje rozdělit na:

- a) stroje s hladkým rotorem
- b) stroje s vyniklými póly

Dále můžeme synchronní stroje rozdělit podle typu chlazení. Existují stroje chlazené vzduchem, vodou nebo vodíkem. Typ chlazení se volí podle velikosti stroje a podle ztrát, které v něm vznikají.

1.1.1. Stroje s hladkým rotorem

Stroje s hladkým rotorem a tedy s nevyjádřenými póly se nazývají turbostroje. Turbostroje jsou většinou poháněny parní nebo plynovou turbínou. Tyto stroje mají dnes jednu nebo ve výjimečných případech dvě pólové dvojice a při frekvenci 50 Hz se tedy otáčejí synchronní rychlostí 3000 ot.min^{-1} .

Rotor těchto strojů má malý průměr a je dlouhý. Asi po dvou třetinách obvodu rotoru jsou umístěny drážky, ve kterých je uloženo budicí vinutí. Toto vinutí rotoru je jištěno proti odstředivým silám pomocí klínů, které se vyrábějí z nemagnetické oceli. Čela budicího vinutí jsou spojena obručí, která je také vyrobena z nemagnetické oceli. Po zbytku obvodu rotoru drážky nejsou a uzavírá se tedy hlavní magnetický tok.

Tlumičí vinutí je tvořeno kovovými klíny umístěnými v rotorových drážkách. Vinutí zabraňuje nepříznivému kývání rotoru a zlepšuje dynamickou stabilitu stroje.

1.1.2. Stroje s vyniklými póly

Stroje s vyniklými póly se mohou také nazývat hydrostroje. Jsou konstruovány buď jako horizontální nebo jako vertikální. Tyto stroje jsou poháněny vodní turbínou a jsou to stroje pomaloběžné, mají tedy velký počet pólů.

Horizontální konstrukce stroje se využívá např. u synchronních motorů, kompenzátorů nebo u alternátorů ve vodních elektrárnách s vysokým spádem. Vertikální stroje se používají ve vodních elektrárnách s nízkým spádem.

Jak už bylo řečeno, rotor s vyniklými póly se používá pro pomaloběžné stroje, musí tedy mít velký počet pólů (více jak čtyři). Rotor těchto strojů je krátký a má velký průměr. Hřídel je vykovaná vcelku s ložiskovými čepy a uprostřed má tvar čtyřbokého nebo šestibokého hranolu, na kterém jsou nasazeny póly. Dále se na hřídel nasazuje kované nebo lité jho rotoru buď přímo nebo u větších průměrů rotoru pomocí rotorové hvězdice. Na jho se připevňují vyniklé póly zhotovené z masivní ocelolitiny nebo mohou u strojů s více póly být poskládané z plechů. Na pólech je nasazeno budicí vinutí. Vinutí se spojuje do série a je vytvořeno z holého měděného pásu ohýbaného na výšku. Jednotlivé vrstvy vinutí jsou ještě prokládány izolací. Přívod budicího proudu se zajišťuje buď přes kroužky, na které doléhají kartáče

vyrobené z grafitu nebo se budicí proud přivádí z bezkontaktní budicí soustavy s rotujícím usměrňovačem.

V drážkách pólových nástavců je umístěno tlumicí vinutí, které je provedeno jako tyče spojené na obou koncích spojovacími kruhy. Toto tlumicí vinutí má stejnou funkci jako u strojů s hladkým rotorem.

1.2. Provozní stavy synchronního stroje

Synchronní stroje se nejčastěji používají jako generátory pro výrobu elektrické energie, v takovém případě se zkráceně nazývají alternátory. Mají však i jiné možnosti využití, např. se mohou používat jako motory, kompenzátory nebo jako synchronované asynchronní motory.

1.2.1. Samostatně pracující synchronní alternátor

V energetice se setkáváme se samostatně pracujícím synchronním alternátorem jen velmi málo. Může např. sloužit jako záložní zdroj pro napájení určité oblasti při výpadku elektrické energie nebo se používá k napájení sítě, která ještě nebyla připojena k energetické soustavě. Častěji je samostatně pracující synchronní alternátor využíván v rozvojových zemích, kde se používá k napájení administrativních center. Alternátory s menším výkonem se používají jako záložní zdroje v lodních elektrárnách nebo jako přenosné centrály.

Někdy se také můžeme setkat se dvěma a více paralelně pracujícími synchronními alternátory. Používáme je pro stejné účely jako samostatně pracující alternátor, musíme však zajistit rovnoměrné rozdělení výkonů, aby došlo k synchronizaci strojů při postupném spouštění.

1.2.2. Synchronní alternátor napájející energetickou síť

Někdy se můžeme setkat s případem, kdy máme za úkol sledovat chování a zajišťovat provoz synchronního alternátoru, který napájí energetickou síť společně s několika dalšími synchronními alternátory. Takové sítě se nazývají sítě s nekonečným výkonem nebo mluvíme o přípojnicích s nekonečně tvrdým zdrojem.

Při tomto chodu se stroj vyznačuje tím, že jalový výkon dodávaný do sítě tímto strojem se řídí změnou buzení stroje a činný výkon se řídí změnou momentu stroje. Tyto dva výkony, činný a jalový, lze regulovat nezávisle na sobě. Nekonečně tvrdá síť je při napájení alternátorem schopna přijmout jakékoliv množství činné nebo jalové energie.

Jestliže synchronní alternátor napájí energetickou síť společně s více alternátory, je jeho výkon zanedbatelný oproti výkonům těchto ostatních alternátorů. Musí se tedy svými provozními parametry přizpůsobit provozním parametrům sítě. Aby nedocházelo při připojování alternátoru na síť k velkým proudovým nárazům, používá se proces fázování. Při fázování požadujeme vlastně splnění těchto podmínek:

- 1) Stejný sled fází alternátoru a sítě
- 2) Velikost napětí alternátoru musí být stejná jako velikost napětí sítě
- 3) Frekvence alternátoru se musí rovnat frekvenci sítě
- 4) Okamžité hodnoty napětí alternátoru musí být shodné jako okamžité hodnoty napětí sítě

Pro kontrolu stejného sledu fází alternátoru a sítě se používá asynchronní motor, který se po připojení na stejné fáze alternátoru a sítě musí roztočit stejným směrem.

Stejná velikost napětí alternátoru a sítě se kontroluje pomocí dvou voltmetrů nebo pomocí nulového voltmetru ukazujícího rozdíl napětí sítě a alternátoru v jedné fázi. V případě nerovnosti napětí sítě a alternátoru se napětí alternátoru doreguluje změnou buzení.

Shodnost kmitočtu sítě a alternátoru kontrolujeme pomocí dvou kmitoměrů. Případný rozdíl frekvencí se vyrovná změnou otáček poháněcího stroje.

Kontrola shodnosti okamžitých hodnot napětí sítě a alternátoru se provádí pomocí synchronoskopu, nulového voltmetru nebo fázovacích žárovek. Tyto přístroje ukazují součet okamžitých hodnot napětí sítě a alternátoru.

V praxi se alternátor používá ve dvou případech. V prvním případě alternátor napájí síť přes transformátor. V druhém případě se výkon dodávaný alternátorem rozdělí. Jedna část výkonu napájí vymezenou síť, která má charakter konečné impedance. Druhá část výkonu napájí síť s nekonečným výkonem.

1.2.3. Synchronní motor

Synchronní motor se vyznačuje, jak už je z jeho názvu patrné tím, že se točí synchronními otáčkami. Určité problémy ovšem může tvořit jeho rozběh, protože se sám bez dodatečného opatření nerozběhne. Další nevýhodou synchronních motorů je jejich malý záběrný moment.

Obecně se synchronní motor používá tam, kde je požadavek, aby se stroj točil synchronními otáčkami v klidovém stavu se stálým zatížením bez častých rozběhů nebo reverzací. V praxi se s ním můžeme setkat například v přečerpávacích vodních elektrárnách, kde v době špičky

synchronní stroj pracuje jako generátor, ale v době mimo špičku pracuje jako motor, který pohání čerpadlo čerpající vodu do horní nádrže.

Jak už zde bylo napsáno, jistý problém tvoří u synchronního motoru jeho rozběh. Jelikož se sám nerozběhne, používáme několik druhů rozběhů.

Jedním ze způsobů, jak rozběhnout synchronní motor je kmitočtový rozběh. Při tomto rozběhu se motor roztáčí pomocí postupného zvyšování frekvence a už při malých frekvencích je schopen vtáhnout se do synchronismu. Nevýhodou je, že při náhlé změně momentu zátěže může motor ze synchronismu vypadnout. S kmitočtovým rozběhem se můžeme setkat u přečerpávacích vodních elektráren, kde se pomocí energie vody stékající z horní nádrže rozběhne alternátor na malé otáčky, které se postupně zvyšují. Po dosažení jmenovitých otáček se synchronní motor pohánějící čerpadlo pomocí synchronizačního zařízení připojí k síti.

Druhý způsob, jak rozběhnout synchronní motor, je asynchronní rozběh. Motor se rozbíhá jako klecový asynchronní motor. U stojů s hladkým rotorem se klec nahrazuje drážkovými klíny společně s masivním rotorem, u strojů s vyniklými póly klec nahrazují měděné tyče v drážkách pólových nástavců, které jsou na obou koncích propojené spojovacími kruhy. Při rozběhu se motor nejprve roztočí na asynchronní otáčky bez použití budicího vinutí, následně se při otáčkách blízkých synchronním otáčkám budicí vinutí připojí k budicímu napětí a rotor se vtáhne do synchronismu. Důsledkem vtažení rotoru do synchronismu může být u některých motorů kývání rotoru vlivem jeho hmotnosti. V tomto případě pak klec plní i funkci tlumiče, která tlumí kývání díky vířivým proudům v ní indukovaným. Motor je spouštěn při plném napětí sítě, takže síť musí být navržena na záběrný proud, aby poklesy napětí neovlivnily rozběh motoru. Záběrný proud při rozběhu je omezen pouze rázovou reaktancí a reaktancí sítě.

Dalším způsobem rozběhnutí synchronního motoru je rozběh pomocným roztáčecím motorem. Je to způsob rozběhu motoru obdobný asynchronnímu rozběhu. Pomocný motor je obvykle asynchronní motor se stejným počtem pólů jako má synchronní motor. Pomocí roztáčecího motoru se rotor roztočí na asynchronní otáčky, zapne se buzení a rotor se vtáhne do synchronismu. Během rozběhu musíme budicí vinutí chránit ochranným odporem, protože se do něj indukuje velké napětí a hrozí tak nebezpečí průrazu izolace.

1.2.4. Synchronní kompenzátor

Jedná se o přebuzený synchronní motor běžící naprázdno, který do sítě dodává jalovou energii potřebnou pro chod transformátorů a asynchronních motorů. Odlehčuje tak od těchto jalových výkonů alternátory v elektrárnách a síť mezi alternátorem a kompenzátozem. To vede k lepšímu využití alternátorů v elektrárnách, ke snížení ztrát v síti a ke zvýšení napětí sítě v místě kompenzátoru díky odstranění úbytků napětí na síti způsobeným jalovým proudem ve vedení. Synchronní kompenzátor se také používá ke zlepšení účinníku ve velkých energetických uzlech nebo v průmyslových podnicích a ke zlepšení stability přenosu. Kompenzátor odebírá ze sítě činnou energii, která je potřeba pro pokrytí vlastních ztrát. Tato odebíraná energie je však velice malá.

Kompenzátor může také být v podbuzeném stavu, kdy naopak jalovou energii ze sítě odebírá. V podbuzeném stavu se kompenzátor chová jako tlumivka a kompenzuje tak vliv kapacity sítě. V podbuzeném stavu se kompenzátor používá u sítí s malým zatížením.

Stejně jako u synchronního motoru je i u synchronního kompenzátoru problém s jeho rozběhem. Nejčastěji se při rozběhu využívá asynchronního momentu, stejně jako u asynchronního rozběhu synchronního stroje. Princip nabuzení je také obdobný. V sítích, kde je nepřípustný proudový náraz při rozběhu kompenzátoru, se používá pomocný roztáček motor.

Jelikož synchronní kompenzátor není zatížený, může mít odlehčenou konstrukci, nejvíce je odlehčená hřídel kompenzátoru. Chlazení velkých kompenzátorů se provádí pomocí vodíkového chlazení, které je o to jednodušší, že kompenzátory nemají vyvedenou hřídel. Použití vodíkového chlazení vede k zmenšení ventilačních ztrát. Kompenzátory se umísťují společně s chlazením do kotle a odpadají tak zbytečné ucpávky a těsnění.

2. Budicí soustavy synchronních strojů

Pod pojmem budicí soustava si můžeme představit zdroj stejnosměrného proudu, který zajišťuje buzení synchronního stroje. Budicí soustava sestává z budiče s odbuzovačem, čidel pro měření regulovaných veličin a regulátoru buzení.

K hodnocení vlastností soustav se používají některé veličiny, podle kterých je můžeme srovnávat. Jsou to především tyto hodnoty:

Stropní napětí U_{bs} [V] – je to maximální hodnota stejnosměrného napětí na výstupu budiče, který je zatěžován odporem stejným, jaký je odpor budicího vinutí při jeho provozní teplotě. [1]

Poměrné stropní napětí K_s [-] – je hodnota vypočítaná ze vztahu $K_s = \frac{U_{bs}}{U_{bN}}$, kde U_{bN} je hodnota budicího napětí na kroužcích rotoru při jmenovitých hodnotách stroje. [1]

Odezva napětí K_R [s^{-1}] – je hodnota získaná z časového průběhu vzrůstu napětí na budiči měřená v čase 0s - 0,5s. Pro soustavy s dobou odezvy $T_o \leq 0,1s$ je tento interval zkrácen na 0s – 0,1s, protože doba odezvy pro 0,5s nevystihuje jakost soustavy. Odezva napětí pro interval 0s – 0,1s se pro odlišení označuje $K_{R0,1}$. [1]

Doba stropního buzení T_s [s] – je čas, po který je na rotoru stroje přiloženo stropní napětí U_{bs} . [1]

Doba odezvy napětí T_o [s] – je doba, kdy napětí na budiči je rovno 95% rozdílu U_{bs} a U_{bN} . [1]

Dnes je používáno několik způsobů provedení budicí soustavy. Z historického hlediska se dříve nejpoužívanější stejnosměrné točivé budiče nahrazovali alternátorem a polovodičovými usměrňovači, poté se alternátory začaly nahrazovat levnějšími snižovacími napěťovými transformátory kvůli zjednodušení soustavy, jejich ceně a snazší údržbě. Kvůli problémům s přenosem energie přes kartáče a kroužky se začaly používat bezkartáčové soustavy. Proto je dnes několik druhů soustav, které můžeme dělit podle různých hledisek.

První rozdělení je podle způsobu zajištění budicí energie. Podle tohoto hlediska se budicí soustavy dělí na závislé a nezávislé.

Závislá soustava je taková soustava, která odebírá budicí energii ze sítě napájející buzený stroj nebo z jiné sítě. Soustava je na stavu sítě tedy závislá. Protože odebíraná energie ze sítě má střídavý charakter, je nutné ji změnit na stejnosměrnou, která je potřeba k buzení.

U **nezávislé soustavy** naopak zdroj buzení není závislý na stavu sítě, ke které je synchronní stroj připojen. Zdrojem buzení je stejnosměrný nebo střídavý točivý budič, který je poháněn hřídelí stroje.

Dále můžeme rozdělit budicí soustavy podle přívodu budicího proudu na kartáčové a bezkartáčové.

U **kartáčových soustav** je budicí proud do budicího vinutí stroje přiváděn přes kartáče a sběrací kroužky. Kartáčová soustava se může dále rozdělit na statickou soustavu nebo na soustavu s točivým budičem. U statické soustavy se pro buzení používá řízený nebo neřízený usměrňovač. Soustava s točivým budičem je buzena stejnosměrným strojem s komutátorem.

U **bezkartáčové soustavy** se budicí proud nepřivádí přes kartáče a kroužky, ale je přiváděn rovnou z usměrňovače, který je umístěn na společné hřídeli společně s budícím vinutím a zdrojem energie pro buzení.

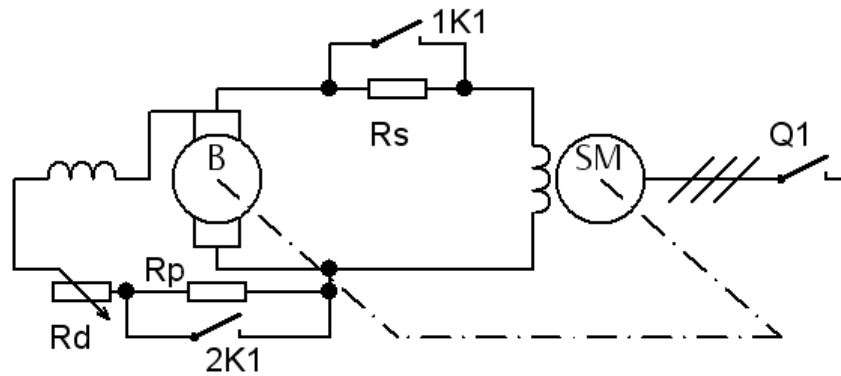
Budicí soustavy se dále můžou dělit podle rychlosti na rychlé a pomalé. Rychlé soustavy jsou takové, které mají dobu odezvy $T_o \leq 0,1s$, ostatní soustavy jsou pomalé.

2.1. Kartáčové budicí soustavy

2.1.1. Budicí soustava s rotačním budičem

U této budicí soustavy se jako zdroj budicího proudu nejčastěji používá stejnosměrné derivační dynamo, které je na společné hřídeli společně se synchronním strojem. Proud v obvodu se reguluje pomocí proměnného odporu, který je zařazen do obvodu buzení budicího dynama. Během asynchronního rozběhu se do budicího vinutí indukuje střídavý proud, který se uzavírá přes kotvu dynama. Při tzv. těžkém rozběhu se do série s budícím vinutím a kotvou dynama zařazuje spouštěcí odpor, který se po rozběhu vyřadí spínacím kontaktem spínacího přístroje. Aby se dynamo při rozběhu nenabudilo, umísťuje se do série s buzením dynama předřadný odpor, který zabraňuje nabuzení dynama. Po skončení asynchronního rozběhu se tento předřadný odpor také vyřadí pomocí spínacího kontaktu. Pro přenos proudu na rotor synchronního motoru se používají kroužky. Jedná se tedy o kroužkovou (kartáčovou) soustavu.

U modernějších soustav se jako zdroj buzení dynama používá řízený usměrňovač, který je napájen ze sítě vlastní spotřeby motoru.

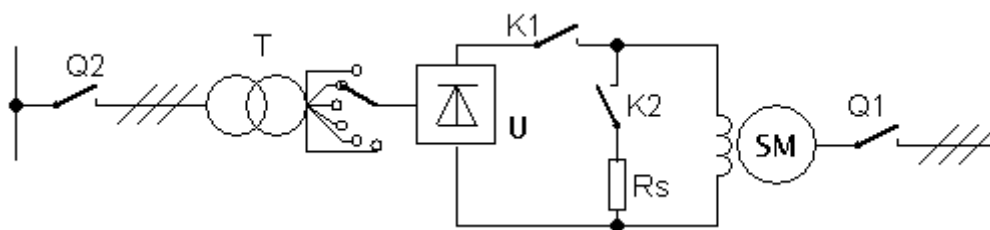


Obr. 1 Budicí soustava s rotačním budičem [5]

2.1.2. Budicí soustava s neřízeným usměrňovačem

Tato soustava má za zdroj budicího proudu diodový usměrňovač napájený přes transformátor. Transformátor je napájený ze sítě vlastní spotřeby motoru. Velikost budicího proudu se nastavuje pomocí transformátorových odboček. Nevýhodou je, že budicí napětí je pevně nastaveno a nelze jej měnit za chodu. Další nevýhodou je velká změna odporu budicího vinutí při plném využití dovoleného oteplení motoru. To má za následek prudký nárůst budicího proudu při rozběhu, kdy je vinutí studené. Motor se přebudí a tím stoupne odběr satorového proudu, který může být větší než na jaký jsou nastaveny ochrany a může dojít k vypnutí motoru těmito ochranami. Díky těmto nevýhodám se budicí soustava dnes téměř nepoužívá.

V době rozběhu je usměrňovač na stejnosměrné straně odpojen a budicí vinutí je zkratováno spínačem, se kterým je do série spojený spouštěcí odpor.



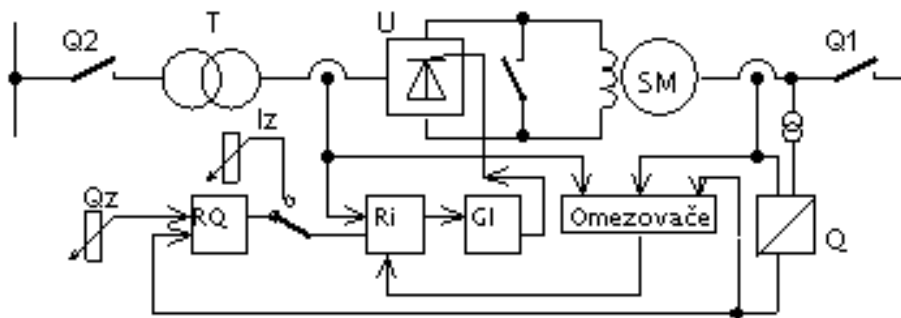
Obr. 2 Budicí soustava s diodovým usměrňovačem [5]

2.1.3. Budicí soustava s řízeným usměrňovačem

Zdroj budicího proudu je v tomto případě také usměrňovač, ale tentokrát je řízený pomocí tyristorů. Usměrňovač je napájený přes bezodbočkový transformátor napájený ze sítě vlastní spotřeby motoru. Transformátor slouží k přizpůsobení budicího napětí a ke galvanickému oddělení obvodu buzení. Budicí proud se udržuje na nastavené hodnotě pomocí proudové

smyčky regulátoru proudu bez ohledu na změnu odporu budicího vinutí vlivem teploty nebo na kolísání napětí napájecí sítě. Budicí soustava může být také doplněna nadřazeným regulačním obvodem, který udržuje na konstantní hodnotě síťový účinník $\cos \varphi$ nebo udržuje konstantní jalový výkon a dále může být soustava doplněna o omezovače satorového a rotorového proudu na mez podbuzení. Tento omezovač pracuje jako regulátor, který při překročení nastavené hodnoty budicího proudu ve satoru nebo rotoru sníží budicí proud tak, aby motor pracoval pouze s nastavenými hodnotami budicího proudu. Obdobně se zachová omezovač i při opačné situaci, kdy dojde k překročení meze podbuzení. V takovém případě omezovač zvýší budicí proud tak, aby byl opět v nastavených mezích.

Po dobu rozběhu motoru je stejnosměrná strana usměrňovače zkratována pomocí stykače a řídicí impulsy usměrňovače jsou tak blokovány. Místo stykače se mohou pro zkratování použít dva antiparalelně zapojené tyristory, které jsou řízené spínacím obvodem indikujícím velikost napětí na nich.

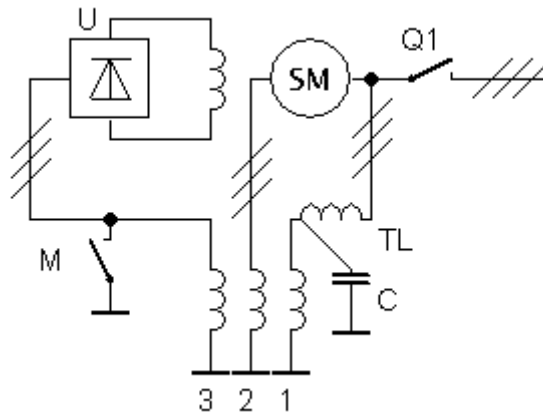


Obr. 3 Budicí soustava s řízeným usměrňovačem [5]

2.1.4. Kompaundační budicí soustava

Zdrojem budicího proudu v soustavě je diodový usměrňovač napájený ze speciálního kompaundačního transformátoru. Tento transformátor je uspořádán tak, že každá fáze má tři vinutí. První vinutí je napájeno z napájecí sítě přes reaktor. Proud je v tomto vinutí fázově posunutý o 90° za napětím sítě a jeho velikost je napájecímu napětí úměrný. Aby nedošlo k porušení úměrnosti proudu s napájecím napětím vlivem napětí na vinutí transformátoru, připojuje se do obvodu ještě kondenzátor. Ten společně s prvním vinutím transformátoru a reaktorem tvoří Boucherotův obvod, kterým při splnění podmínky $\omega_s = \frac{1}{\sqrt{L \cdot C}}$ protéká proud úměrný napětí sítě. Druhé vinutí je připojeno ke satoru stroje, je tak protékáno satorovým proudem. Třetí vinutí je spojeno s usměrňovačem a proud jím protékající, je dán fázorovým součtem proudů v prvním a druhém vinutí. Pokud se vhodně zvolí počet závitů, utvoří proudy

jednotlivými vinutími trojúhelník, který je podobný trojúhelníku složek budicího proudu. Budicí soustava tedy sama reguluje budicí proud podle zátěže bez použití regulátoru. Aby se motor mohl odbudit, připojuje se k třetímu vinutí ještě stykač, po jehož sepnutí se motor odbudí.



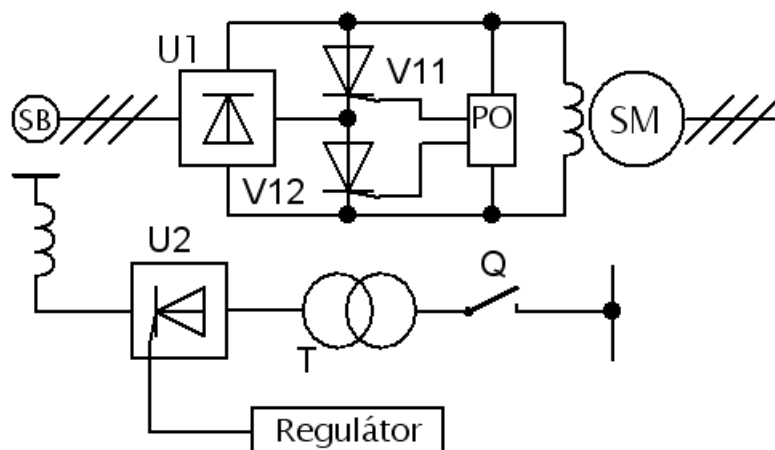
Obr. 4 Kompaundační budicí soustava [5]

2.2. Bezkartáčové budicí soustavy

2.2.1. Budicí soustava se střídavým budičem a rotujícím usměrňovačem

Budicí vinutí je napájeno ze střídavého budiče. Je to vlastně speciální synchronní generátor s vyniklými póly na statoru, v drážkách rotoru má uloženo trojfázové vinutí. Budicí proud pro střídavý budič se odebrává z jednofázového řízeného usměrňovače nebo z pulzního měniče. Při nabuzení se do rotorového vinutí střídavého budiče indukuje střídavé napětí. Toto vinutí je přivedeno na vstup neřízeného usměrňovače, jehož výstupní strana je zdrojem budicího proudu pro motor. Pokud je rozběh synchronního motoru realizován asynchronním rozběhem, je nutno do obvodu zapojit ještě přepětovou ochranu. Ochrana spíná tyristory zapojené antiparalelně k usměrňovači v okamžiku asi dvojnásobku jmenovitého napětí. Tak je rotor při asynchronním rozběhu zkratován v jedné polaritě tyristory a v druhé polaritě diodami neřízeného usměrňovače.

Nevýhoda této budicí soustavy je, že není schopna nabudit motor stojící v klidu. U motoru, kde je použita budicí soustava se střídavým budičem, tedy nelze použít například frekvenční rozběh.



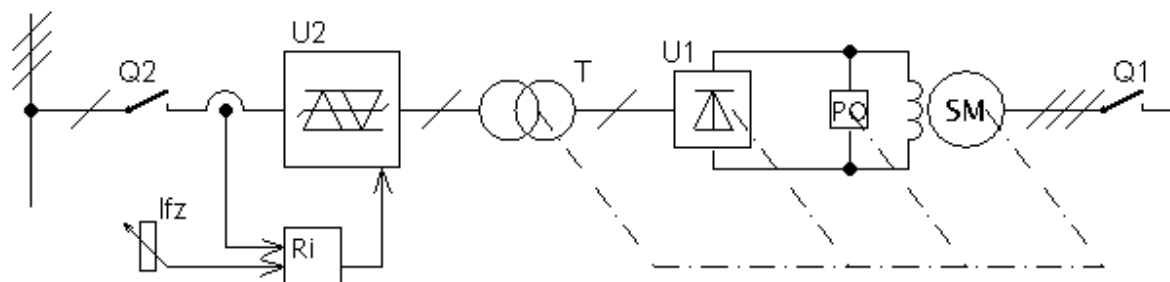
Obr. 5 Budicí soustav se střídavým budičem a rotujícím usměrňovačem [5]

2.2.2. Budicí soustava s rotačním transformátorem a diodovým usměrňovačem

Základním prvkem této budicí soustavy je rotační transformátor, který přenáší budicí proud ze statického primárního vinutí drženého jhem transformátoru do rotujícího sekundárního vinutí spojeného s hřídelí. Magnetický obvod statické části transformátoru je tvořený jeho jhem a magnetický obvod rotační části je tvořený navinutými transformátorovými plechy. Aby svitky plechů neutvořili vinutí, jsou ještě podélně vyfrézovány. Primární vinutí rotačního transformátoru je napájeno z jednofázového střídavého měniče napětí, který je ještě doplněn o proudovou regulační smyčku. Sekundární vinutí napájí neřízený rotující usměrňovač, který dále napájí stejnosměrným proudem budicí vinutí stroje. Při asynchronním rozběhu je opět nutno použít přepětovou ochranu.

Nevýhodou je, že rotačním transformátorem a měničem prochází plný budicí výkon. Další nevýhodou je vzduchová mezera v magnetickém obvodu transformátoru a velký magnetizační proud, což má vliv na rozměry stroje. Rotační transformátor je složitý a jeho konstrukční uspořádání je prakticky proveditelné pouze do otáček 1500 ot/min.

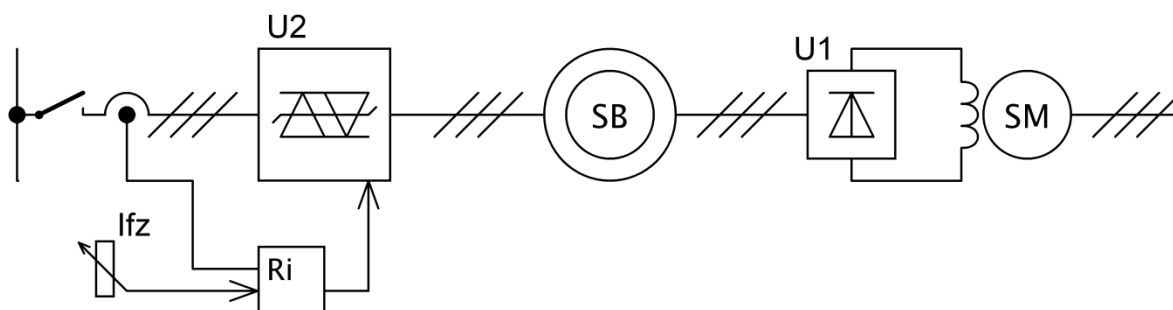
Naopak výhodou je rozměrová nezávislost rotačního transformátoru a velikost přenášeného výkonu na otáčkách.



Obr. 6 Budicí soustava s rotačním transformátorem a neřízným usměrňovačem [5]

2.2.3. Budicí soustava s budičem s protiběžným polem

Zdrojem budicího proudu je opět střídavý budič, ale tentokrát je provedený jako asynchronní motor s vinutým rotorem pracujícím v brzdícím režimu. Stator budiče je napájen ze sítě vlastní spotřeby přes střídavý trojfázový měnič napětí, který obsahuje i základní regulační smyčku. Rotorové vinutí budiče je vyvedeno na vstup rotujícího diodového usměrňovače dodávajícího budicí proud do budicího vinutí. Jestliže budič pracuje v režimu brzdy, magnetické pole rotoru se otáčí opačným směrem než magnetické pole statoru, do vinutí rotoru se tedy indukuje jak transformační, tak rotační složka napětí. Soustava tak umožňuje nabudít motor, i když je v klidu.



Obr. 7 Budicí soustava s budičem s protiběžným polem [5]

3. Použití budicích soustav

Budicí soustavy se používají pro buzení jak synchronních alternátorů, tak pro buzení synchronních motorů a kompenzátorů.

Pro buzení turboalternátorů se používají různé budicí soustavy pro různé výkony. Pro malé turboalternátory do 75 MVA se většinou používají závislé budicí soustavy se statickým řízením usměřovače. Může se také použít bezkartáčová soustava. Pro střední turboalternátory do výkonu 350 MVA se používají závislé, nezávislé a bezkartáčové neřízené soustavy. Velké turboalternátory od výkonů 350 MVA mají nezávislé budicí soustavy se statickým měničem nebo bezkartáčové soustavy.

U hydroalternátorů se používají pro všechny výkony a otáčky závislé budicí soustavy. Pro hydroalternátory s vysokými otáčkami lze také použít budicí soustavu se střídavým budičem na společné hřídeli a statický řízený usměřovač.

Synchronní motory mají závislé budicí soustavy nebo kompaundní budicí soustavy. Tyto soustavy se často regulují na konstantní budicí proud nebo na konstantní $\cos\phi$. Mohou se použít také bezkartáčové budicí soustavy.

U kompenzátorů je převážně používaná závislá budicí soustava.

Na českém trhu je několik firem dodávajících budicí soustavy pro synchronní stroje. Jsou to např. firmy Brush, Invelt, Siemens a ZAT.

Firma Siemens vyrábí budicí soustavy pro všechny výkony generátorů s širokou škálou použití. Pro malé a střední výkony vyrábí tato firma budicí soustavy SIPOL a RG3, pro střední výkony vyrábí soustavu THYRIPART a pro střední a velké výkony nabízí soustavy THYRISIEM a THYRIPOL.

Další firmou na trhu s budicími soustavami je firma Brush. Nejpoužívanější budicí soustavou od této firmy je budicí soustava PRISMIC A50 (katalog viz příloha č. 4), které jsou instalovány na některých vodních elektrárnách vltavské kaskády. Dalšími produkty této firmy jsou např. PRISMIC A32, PRISMIC A30, PRISMIC R10.

4. Návrh budicí soustavy

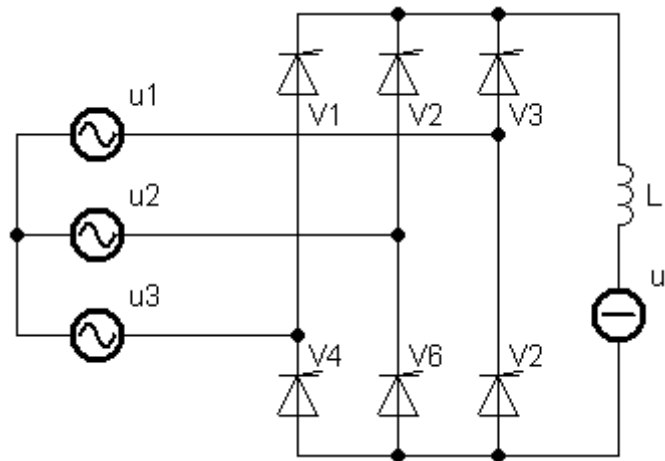
Zadání: Nadimenzujte usměrňovač pro budicí soustavu, který má následující zadané hodnoty a zvolte k němu vhodný chladič tak, aby nedocházelo k přehřívání součástek.

Zadané hodnoty: $U_v = 230 \text{ V}$

$I_{d\max} = 400 \text{ A}$

$T_a = 50 \text{ °C}$

Jako usměrňovač použitý v budicí soustavě jsme zvolili trojfázový plně řízený můstkový usměrňovač, jehož schéma zapojení je znázorněno na obr. 8.



Obr. 8 Trojfázový plně řízený usměrňovač v můstkovém zapojení

4.1. Volba typového proudu součástky

Vlivem průchodu proudu přes výkonové polovodičové součástky dochází ke vzniku výkonových ztrát, které mají na tuto součástku nepříznivý vliv v podobě jejího zahřívání. Při přehřívání součástky dochází k nepříznivým účinkům na polovodičovou strukturu součástky a na spoje v konstrukčním uspořádání součástky. Pravidelné, byť jen malé přehřívání součástky způsobuje její předčasné stárnutí. Při hodně velkém překročení přípustné teploty součástky může dojít k jejímu okamžitému zničení. Proto je nutné pro tyto součástky vhodně navrhnout chlazení a omezit tak jejich ztrátový výkon, aby nedocházelo k jejich přehřívání.

Při navrhování součástky musíme brát zřetel na dovozené oteplení její polovodičové struktury. Dimenzování součástky tedy vychází z toho, že kontrolujeme oteplení těchto polovodičových struktur. Při kontrole oteplení polovodičových struktur vycházíme ze znalosti ztrátového výkonu a ze znalosti způsobu odvodu tepla ze součástky a jeho parametrů.

Aby tedy nedocházelo k nepříznivému přehřívání součástky, musíme určit, jaký proud bude procházet součástkou. Tento proud se nazývá typový proud a je to maximální dovolená střední hodnota proudu tyristorem při úhlu vedení součástkou 180°. Při volbě typového proudu se vždy vychází z nejnepříznivějšího průběhu proudu. S volbou typového proudu musíme zvolit i vhodný chladič, který bude odvádět teplo ze součástky.

Při **volbě typového proudu** se nejprve stanoví maximální střední hodnota průběhu pracovního proudu součástkou pro třífázový plně řízený můstkový usměrňovač. Pro ideálně vyhlazený tvar proudu součástkou je dána vztahem:

$$I_{V(AV)} = \frac{I_{dmax}}{3} = \frac{400}{3} = 133,34 \text{ A} \quad (1)$$

Dále budeme potřebovat efektivní hodnotu pracovního proudu tyristorem, která je dána vzorcem:

$$I_{Vef} = \frac{I_{dmax}}{\sqrt{3}} = \frac{400}{\sqrt{3}} = 230,94 \text{ A} \quad (2)$$

Poté vybereme **z katalogu vhodný tyristor**, jehož typový proud zvolíme na základě vypočítané hodnoty z předchozího vztahu společně s přihlédnutím ke katalogovým hodnotám.

Zvolili jsme modul dvou tyristorů SKKT 250/08E od firmy Semikron **s těmito katalogovými hodnotami** (katalog viz příloha č. 1):

$$I_{V(AV)} = 250 \text{ A}$$

$$U_{TO} = 0,925 \text{ V}$$

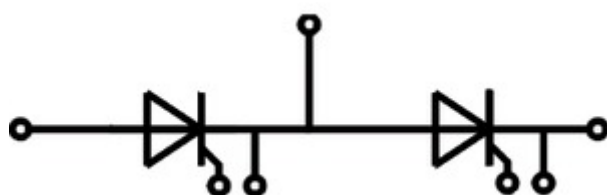
$$R_V = 0,45 \text{ m}\Omega$$

$$T_{jmax} = 130 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$R_{thjc} = 0,075 \text{ K/W}$$



Obr. 9 Obrázek zvoleného modulu se dvěma tyristory SKKT 250/08E



Obr. 10 Schéma zapojení zvoleného modulu SKKT 250/08E

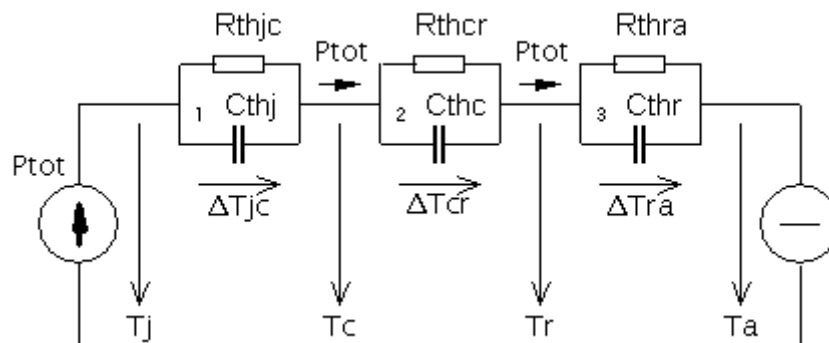
Dalším krokem je stanovení **střední hodnoty totálního ztrátového výkonu**. Ztrátový výkon je důsledek průchodu proudu polovodičovou součástkou. Z hlediska proudu, kterým jsou ztráty způsobeny, jsou ztráty rozlišovány na ztráty propustným proudem, blokovacím proudem, závěrným proudem, řídicím proudem a na spínací ztráty. Spínací ztráty jsou při stanovování ztrátového výkonu zanedbatelné.

Střední hodnota propustných ztrát se dá buď vypočítat pomocí vzorce (3) nebo se dá odečíst z katalogového listu součástky, kde výrobce uvádí závislost střední hodnoty totálního ztrátového výkonu na střední hodnotě proudu tyristoru.

$$P_{tot(AV)} = P_{fw(AV)} = U_{TO} \cdot I_{V(AV)} + R_V \cdot I_{Vef}^2 = 0,925 \cdot 133,333 + 0,45 \cdot 10^{-3} \cdot 230,94^2 = 147,333 \text{ W} \quad (3)$$

Následně se stanoví **střední hodnota teploty pouzdra**. Tu lze opět vysledovat z grafu uvedeného v katalogu součástky nebo se vypočte ze vztahu (4), který vyplývá z náhradního tepelného schématu polovodičové součástky (obr. 11). V tomto schématu se při sledování quazistacionárního stavu neuplatňují tepelné kapacity. Při výpočtu potřebujeme znát maximální možnou hodnotu teploty čipu součástky T_{jmax} a tepelný odpor mezi čipem součástky a pouzdem součástky R_{thjc} . Tyto dvě hodnoty lze vyčíst z katalogového listu součástky.

$$T_{c(AV)} = T_{jmax} - P_{tot(AV)} \cdot R_{thjc} = 130 - 147,333 \cdot 0,075 = 118,95 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (4)$$

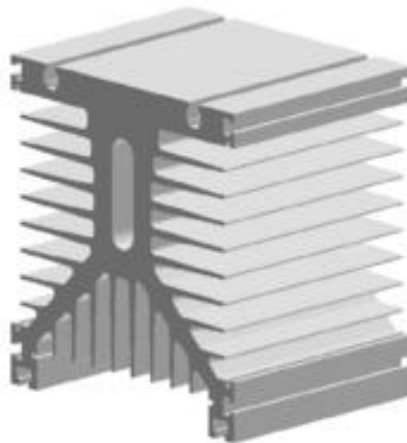


Obr. 11 Zjednodušené náhradní tepelné schéma polovodičové součástky [4]

Posledním krokem je **zvolení chladiče**. Námí zvolený chladič P 3/300 od firmy Semikron (katalog viz příloha č. 2) má tyto parametry:

$$R_{thcr} = 0,02 \text{ K/W}$$

$$R_{thra} = 0,0847 \text{ K/W pro nucené chlazení pomocí ventilátoru SKF 3-230-01}$$



Obr. 12 Obrázek zvoleného chladiče P 3/300

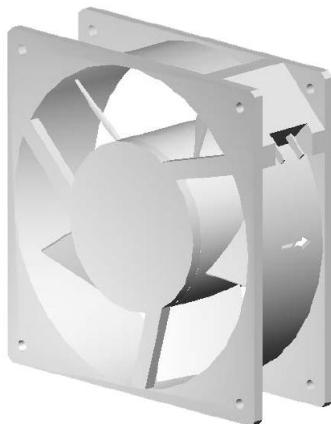
Při volbě chladiče musíme respektovat podmínku, která říká, že pro danou teplotu chladicího média T_a musí platit vztah (5). Teplota T_a se kvůli přiměřené bezpečnosti volí až o $10 \text{ } ^\circ\text{C}$ větší než je ve skutečnosti.

$$R_{th \text{ chladič}} = R_{thcr} + R_{thra} \leq \frac{T_{c(AV)} - T_a}{P_{tot(AV)}} \quad (5)$$

$$R_{thcr} + R_{thra} = 0,02 + 0,0847 = 0,1047$$

$$\frac{T_{c(AV)} - T_a}{P_{tot(AV)}} = \frac{118,95 - 50}{147,333} = 0,468$$

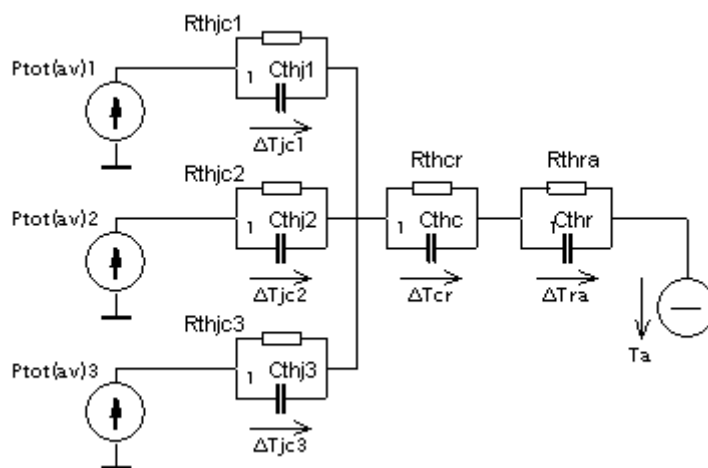
Podmínka je tedy splněna i díky nucenému chlazení, které se zajišťuje pomocí ventilátoru SKF 3-230-01 od firmy Semikron (katalog viz příloha č. 3).



Obr. 13 Obrázek zvoleného ventilátoru SKF 3-230-01

Pokud podmínka (5) splněna není, chlazení není dostatečné a musíme si zvolit součástku s vyšším typovým proudem. Poté se postup opakuje stejným způsobem, dokud není podmínka (5) splněna.

Pro kontrolu se ještě stanoví střední hodnota teploty čipu a zahrnuje i ostatní moduly použité v usměrňovači. Tato hodnota nesmí přesáhnout maximální hodnotu teploty čipu. Vychází z náhradního schématu na obr. 12.



Obr. 14 Náhradní tepelné schéma námi zvolených modulů pro usměrňovač a chlazení

$$T_{j(AV)V} = T_a + \sum_{V=1}^n P_{tot(AV)V} \cdot (R_{thcr} + R_{thra}) + P_{tot(AV)V} \cdot R_{thjc} \quad (6)$$

Kde n je počet paralelních větví představujících náhradní tepelné schéma součástky. Pro náš konkrétní případ tedy platí:

$$T_{j(AV)V} = T_a + (3 \cdot P_{tot(AV)V}) \cdot (R_{thcr} + R_{thra}) + P_{tot(AV)V} \cdot R_{thjc} = 50 + \\ + (3 \cdot 147,333) \cdot (0,02 + 0,847) + 147,333 \cdot 0,075 = 107,327 \text{ } ^\circ\text{C}$$

4.2. Napěťová zatížitelnost součástky

V obvodu měniče se mohou vyskytnout dva druhy přepětí. Těmito přepětími jsou přepětí vnější a vnitřní. Vnější přepětí je způsobeno vnějšími vlivy, jako je např. atmosférické přepětí. Vnitřní přepětí vzniká přímo v samotném obvodu měniče a může být způsobeno komutací, poruchami nebo spínáním uvnitř měniče.

Při volbě **napěťové zatížitelnosti** polovodičové součástky se vychází ze znalosti maximálního pracovního napětí v závěrném směru (U_{RWM}) a blokovacím směru (U_{DWM}). Ty se určí analýzou měniče a z ní odvozených idealizovaných průběhů napětí na součástce. Pracovní napětí v závěrném a blokovacím směru se tedy určí ze vzorce:

$$U_{RWM} = U_{DWM} = \sqrt{2} \cdot U_v = \sqrt{2} \cdot 230 = 325,269 \text{ V} \quad (7)$$

Pro volbu **napěťové třídy** součástky jsou důležité parametry U_{RRM} a U_{DRM} , k jejichž překročení nesmí dojít.

U_{RRM} je opakovatelné závěrné špičkové napětí. Je to nejvyšší možné závěrné napětí, které se může na součástce periodicky opakovat. [4]

U_{DRM} je opakovatelné blokovací špičkové napětí. Je to nejvyšší možné blokovací napětí, které se může na součástce periodicky opakovat. [4]

Tyto hodnoty se určí pomocí vzorců:

$$U_{RRM} = K_U \cdot U_{RWM}; U_{DRM} = K_U \cdot U_{DWM} \quad (8)$$

V těchto vzorcích se vyskytuje koeficient bezpečnosti K_U , který zahrnuje všechna přepětí, která se mohou vyskytnout na měniči a dále zahrnuje i kolísání napětí sítě. Jeho hodnota se obvykle volí mezi hodnotami 1,5 až 2,5. Pro náš zvolený modul při zvolení $K_U = 2$ tedy podle vzorce (8) platí:

$$U_{RRM} = U_{DWM} = 2 \cdot U_{RWM} = 2 \cdot 325,269 = 650,538 \text{ V}$$

Z katalogu modulu dvou tyristorů SKKT 250/08E lze vyčíst hodnotu U_{RRM} 800 V, k jejímuž překročení tedy nedošlo.

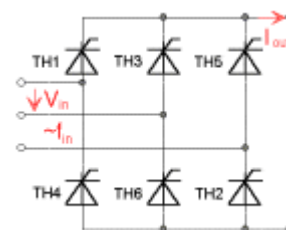
4.3. Kontrola výsledků pomocí softwaru

Pro kontrolu dosažených výsledků lze použít software. Při navrhování měničů jsou to např. softwary Iposim nebo Semisel. My jsme pro kontrolu zvolili software Semisel od firmy Semikron.

Vstupní parametry:	V_{in}	230 V
	I_{out}	400A
	f_{in}	50 Hz
	Zvolená součástka	SKKT 250
	T_a	50 °C
	Chladič	P 3/300

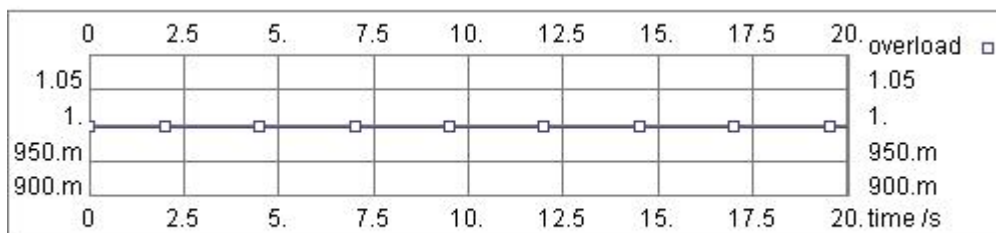
Po zadání parametrů do softwaru vyšel tento projekt:

Project:	
Topology	AC/DC
Circuit	B6C



Circuit:

V_{in}	230 V
I_{out}	400 A
$I_{out\ rms}$	400 A
f_{in}	50 Hz
Form Factor	1.7321
Overload factor	1



Overload duration	10sec
-------------------	-------

Device :

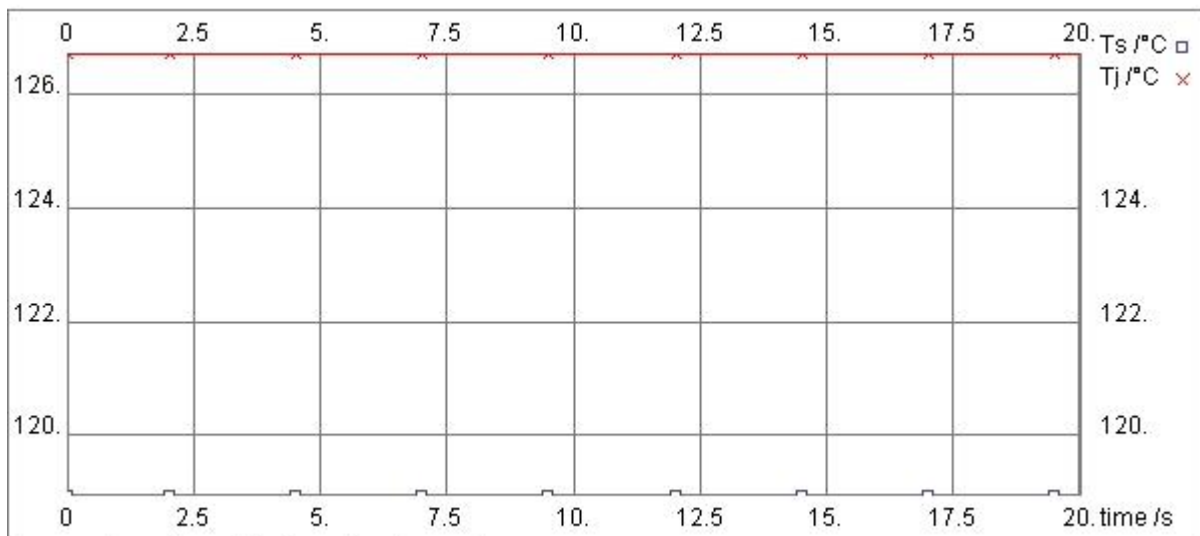
Product line	SemiPack
Device	SKKT250
Recommended voltage	800V
Max. junction temperature	130 °C
Use maximum values	Yes
$V_{T0.25} = 1.08V$	$V_{T0.125} = 0.91V$
$r_{T.25} = 0.48\ m\Omega$	$r_{T.125} = 0.51\ m\Omega$
$R_{th(j-s)} = 0.18\ K/W$	
Data set from:	Not set
	No Comment

Cooling:

Ambient temperature	50 °C
Number of switches per heat sink	6
Number of parallel devices on the same heat sink	3
Additional power source at this heat sink	0 W
Predefined SK-Heat Sink	P3_300
Correction factor	1
Forced Air Cooling, Flow Rate:	135 m ³ /h
R _{th(s-a)}	0.089 K/W

Losses and temperatures:

	Steady State	Overload
Losses_{device}	43 W	43 W
Losses_{tot}	779 W	779 W
Heat Sink Temperature	119 °C	119 °C
Junction Temperature	127 °C	127 °C



Temperature characteristic overload current

Závěr

V teoretické části této práce bylo nejprve uvedeno konstrukční uspořádání synchronního stroje a byly zde popsány jeho základní provozní stavy. Dále se práce věnovala rozdělení a popisu jednotlivých existujících budicích soustav. Na konci práce byl popsán postup při proudovém a napěťovém dimenzování usměřovače. Při proudovém dimenzování se kontroluje maximální dovolené oteplení součástky a jeho součástí je i volba příslušného chladiče. Napěťové dimenzování stanovuje nejvyšší možné opakovatelné špičkové hodnoty napětí na součástce v závěrném a blokovacím směru. Podle těchto hodnot se součástky přiřadí do příslušné napěťové třídy. Postup dimenzování byl rozšířen o dimenzování usměřovače s konkrétními hodnotami a byly pro něj zvoleny konkrétní typy součástek a chladič. Správnost těchto výsledků byla ověřena pomocí softwaru Semisel od firmy Semikron.

Seznam použité literatury

- [1] HORA, Oldřich. Regulační a budicí systémy synchronních strojů. 1. vyd. Praha: SNTL, 1985. ISBN ISBN.
- [2] MĚŘIČKA, Jiří, Václav HAMATA a Petr VOŽENÍLEK. Elektrické stroje. 1. vyd. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2001. ISBN ISBN.
- [3] ROUBÍČEK, Ota. Elektrické motory a pohony. 1. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2004. ISBN ISBN.
- [4] VONDRÁŠEK, František, Jan LANGHAMMER, Aleš PEROUTKA, Jan MĚSÍČEK a Jan MOLNÁR. Projektování výkonových polovodičových měničů - vybrané stati. 1. vyd. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 2008. ISBN ISBN.
- [5] PAVELKA, Jiří, Zdeněk ČEŘOVSKÝ a Jiří JAVŮREK. Elektrické pohony. 2. vyd. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2003. ISBN ISBN.
- [6] Semikron [online]. © 2012 [cit. 2012-05-25]. Dostupné z: www.semikron.com
- [7] BRUSH SEM [online]. © 2012 [cit. 2012-05-25]. Dostupné z: www.brush-sem.cz
- [8] Siemens [online]. ©1996- 2012 [cit. 2012-05-25]. Dostupné z: www.siemens.com
- [9] ZAT [online]. ©2012 [cit. 2012-05-25]. Dostupné z: www.zat.cz
- [10] Invelt Group [online]. ©2012 [cit. 2012-05-25]. Dostupné z: www.invelt.cz

Seznam příloh

Příloha č. 1: Katalogový list modulu se dvěma tyristory SKKT 250 od firmy Semikron

Příloha č. 2: Katalogový list chladiče P 3 od firmy Semikron


Příloha č. 3: Katalogový list ventilátoru SKF 3-230-01 od firmy Semikron

Příloha č. 4: Katalogový list budicí soustavy PRISMIC A 50 od firmy Brush

Přílohy

Příloha č. 1: Katalogový list modulu se dvěma tyristory SKKT 250 od firmy Semikron (1/4)

SKKT 250, SKKH 250



SEMIPACK® 3

Thyristor / Diode Modules

SKKH 250
SKKT 250

Features

- Heat transfer through aluminium nitride ceramic isolated metal baseplate
- Precious metal pressure contacts for high reliability
- Thyristor with amplifying gate
- UL recognized, file no. E 63 532

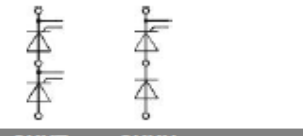
Typical Applications*

- DC motor control (e. g. for machine tools)
- AC motor starters
- Temperature control (e. g. for ovens, chemical processes)
- Professional light dimming (studios, theaters)

1) See the assembly instructions

V _{RSM} V	V _{RRM} , V _{DRM} V	I _{TRMS} = 420 A (maximum value for continuous operation) I _{TAV} = 250 A (sin. 180; T _c = 85 °C)	
900	800	SKKT 250/08E	
1300	1200	SKKT 250/12E	SKKH 250/12E
1700	1600	SKKT 250/16E	SKKH 250/16E
1900	1800	SKKT 250/18E	SKKH 250/18E

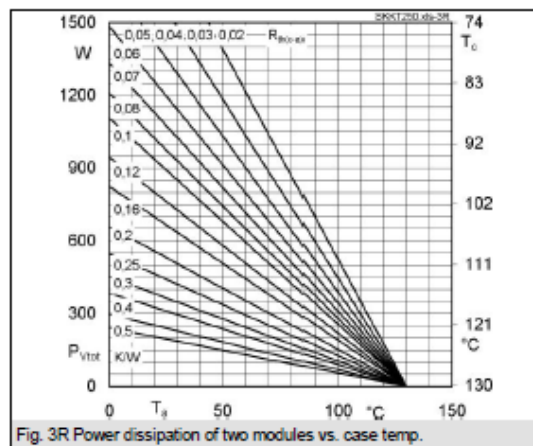
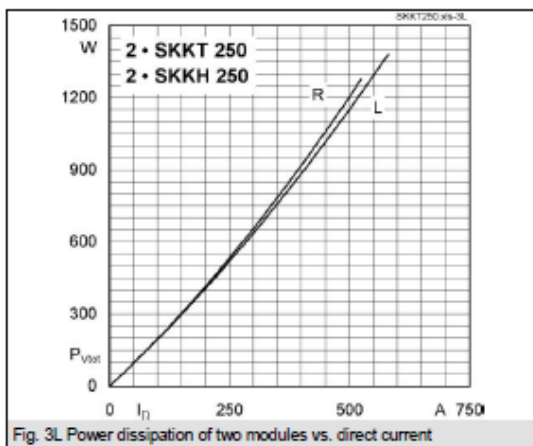
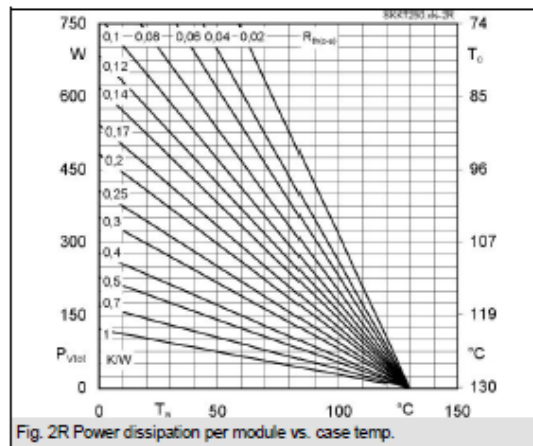
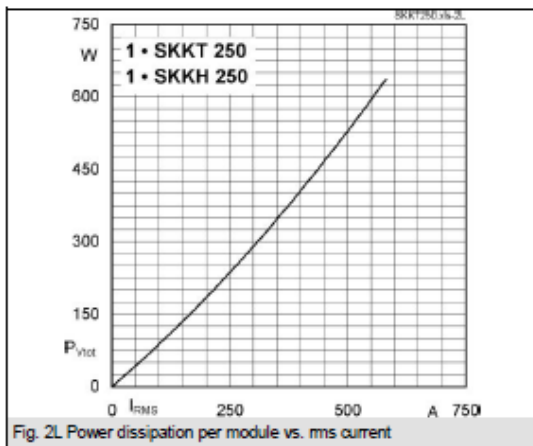
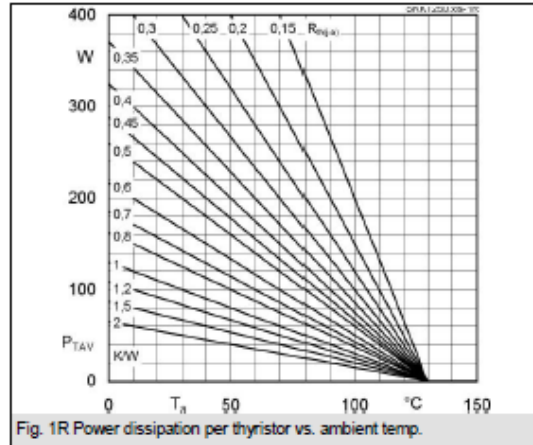
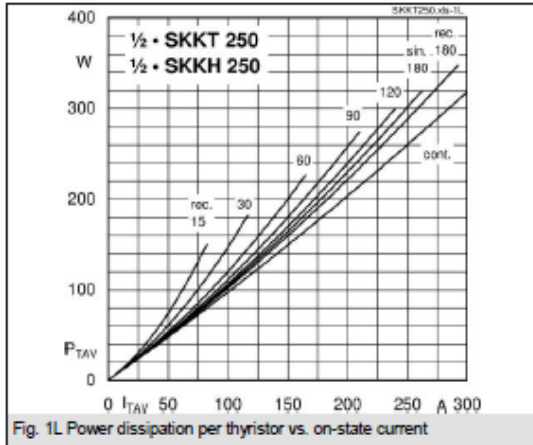
Symbol	Conditions	Values	Units
I _{TAV}	sin. 180; T _c = 85 (100) °C;	250 (178)	A
I _D	P16/200F; T _a = 35 °C; B2/B6	450 / 585	A
I _{RMS}	P16/200F; T _a = 35 °C; W1 / W3	566 / 3 * 471	A
I _{TSM}	T _{vj} = 25 °C; 10 ms	9000	A
	T _{vj} = 130 °C; 10 ms	8000	A
rt	T _{vj} = 25 °C; 8,3 ... 10 ms	405000	A ² s
	T _{vj} = 130 °C; 8,3 ... 10 ms	320000	A ² s
V _T	T _{vj} = 25 °C; I _T = 750 A	max. 1,4	V
V _{T(TO)}	T _{vj} = 130 °C	max. 0,925	V
r _T	T _{vj} = 130 °C	max. 0,45	mΩ
I _{DD} ; I _{RD}	T _{vj} = 130 °C; V _{RD} = V _{RRM} ; V _{DD} = V _{DRM}	max. 85	mA
t _{gd}	T _{vj} = 25 °C; I _D = 1 A; di _D /dt = 1 A/μs	1	μs
t _{gr}	V _D = 0,67 * V _{DRM}	2	μs
(di/dt) _{cr}	T _{vj} = 130 °C	max. 250	A/μs
(dv/dt) _{cr}	T _{vj} = 130 °C	max. 1000	V/μs
t _{tr}	T _{vj} = 130 °C	50 ... 150	μs
I _H	T _{vj} = 25 °C; typ. / max.	150 / 500	mA
I _L	T _{vj} = 25 °C; R _θ = 33 Ω; typ. / max.	300 / 2000	mA
V _{GT}	T _{vj} = 25 °C; d.c.	min. 3	V
I _{GT}	T _{vj} = 25 °C; d.c.	min. 200	mA
V _{GD}	T _{vj} = 130 °C; d.c.	max. 0,25	V
I _{GD}	T _{vj} = 130 °C; d.c.	max. 10	mA
R _{th(j-c)}	cont.; per thyristor / per module	0,14 / 0,07	K/W
R _{th(j-a)}	sin. 180; per thyristor / per module	0,15 / 0,075	K/W
R _{th(j-c)}	rec. 120; per thyristor / per module	0,165 / 0,083	K/W
R _{th(c-a)}	per thyristor / per module	0,04 / 0,02	K/W
T _{vj}		- 40 ... + 130	°C
T _{stg}		- 40 ... + 130	°C
V _{isol}	a. c. 50 Hz; r.m.s.; 1 s / 1 min.	3600 / 3000	V~
M _b	to heatsink	5 ± 15 % ¹⁾	Nm
M _t	to terminals	9 ± 15 %	Nm
a		5 * 9,81	m/s ²
m	approx.	600	g
Case	SKKT	A 73b	
	SKKH	A 76b	



SKKT SKKH

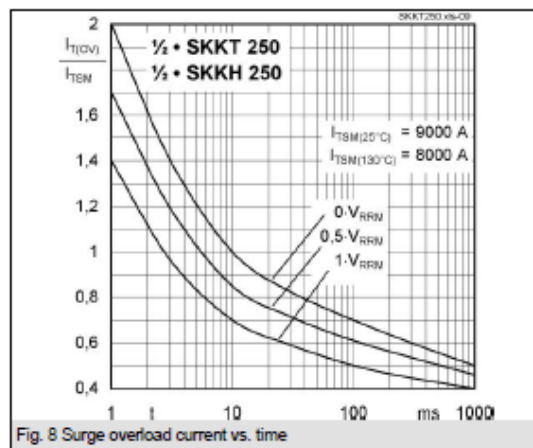
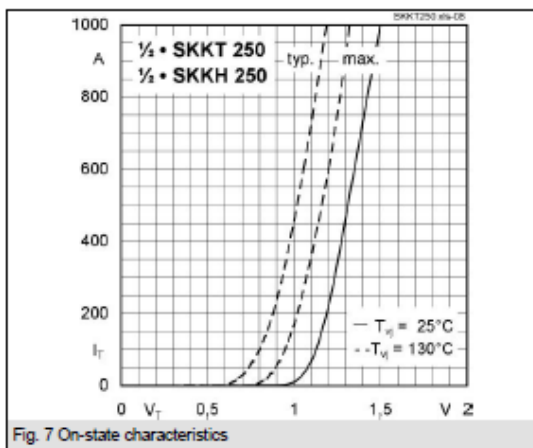
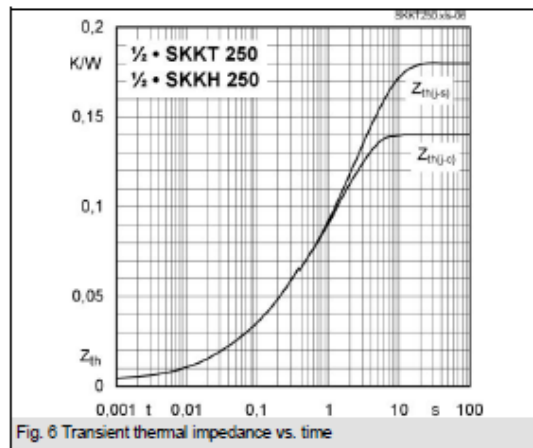
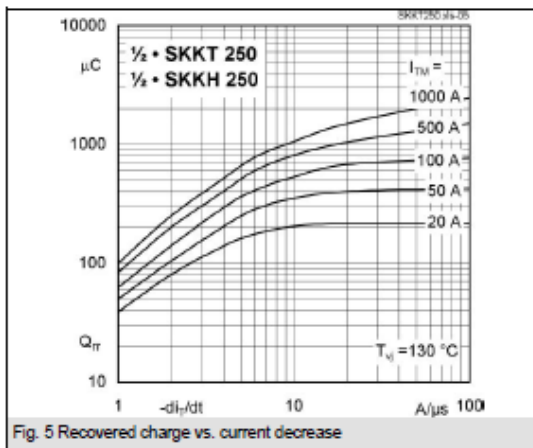
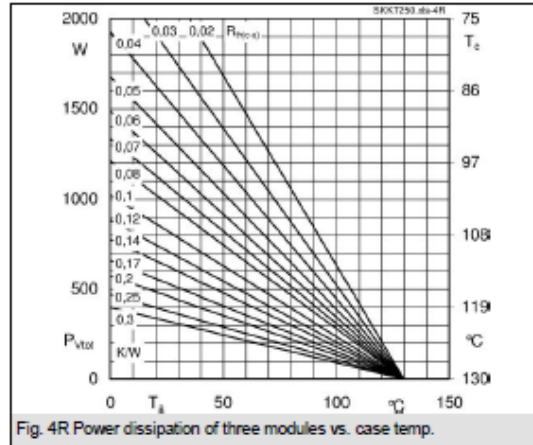
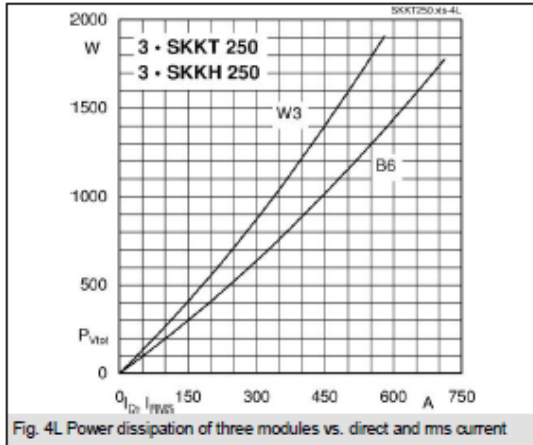
1
18-03-2011 STM
© by SEMIKRON

Příloha č. 1: Katalogový list modulu se dvěma tyristory SKKT 250 od firmy Semikron (2/4)

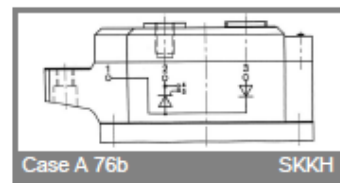
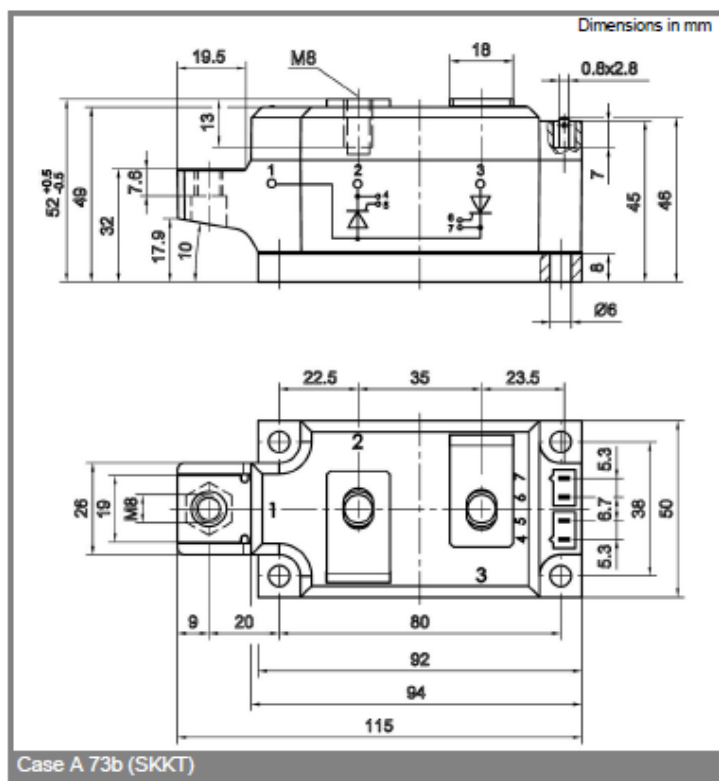
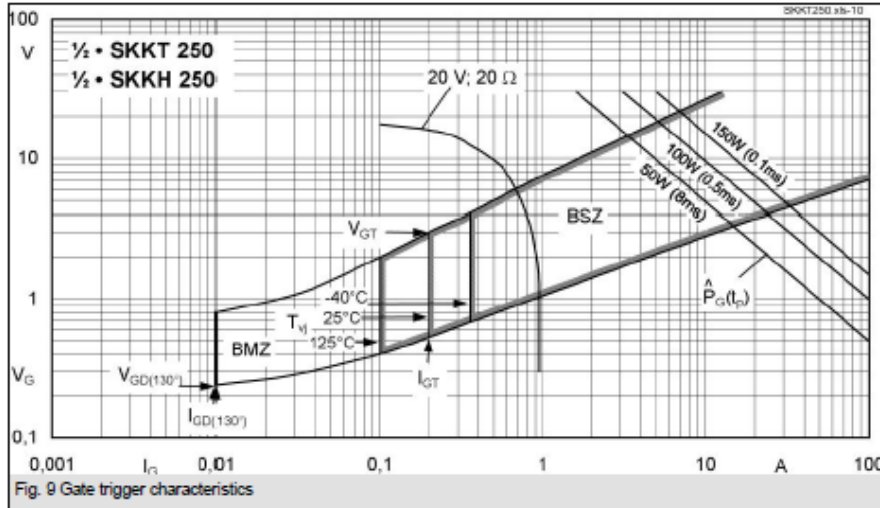


Příloha č. 1: Katalogový list modulu se dvěma tyristory SKKT 250 od firmy Semikron (3/4)

SKKT 250, SKKH 250



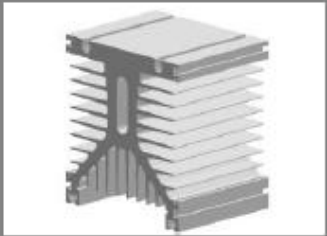
Příloha č. 1: Katalogový list modulu se dvěma tyristory SKKT 250 od firmy Semikron (4/4)



* The specifications of our components may not be considered as an assurance of component characteristics. Components have to be tested for the respective application. Adjustments may be necessary. The use of SEMIKRON

Příloha č. 2: Katalogový list chladiče P 3 od firmy Semikron (1/3)

P 3



Heatsink


Standard lengths	n	b / d Ø mm	$R_{\theta ja}$ natural cooling KW	$R_{\theta ja}$ with Fan SKF 3-230-01 KW	w kg
P 3/120	1	20	0,55 (100W)	0,167	2,1
	3		0,43 (150W)	0,147	
P 3/180	2	20	0,39 (150W)	0,132	3,1
	3		0,36 (180W)	0,12	
	6		0,33 (200W)	0,108	
	1		34	0,144	
3	0,118	0,0847			
P 3/300	3	34			5,3

For isolated power modules

P 3

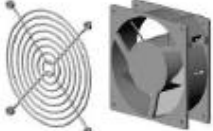
Features

- Intended for isolated power modules, SEMIPACK (1 to 4) and SEMITRANS 2 range
- Integrated rails allow for easy mounting of the modules
- Available in various lengths
- Best fitted fan : SKF 3-230-01
- Mounting bar rails available (see sketches)




Dimensions in mm


P3 general profile dimensions (w = 17,6 kg/m)



Protection grill + Fan SKF 3-230-01




RC network for SKKT/H 19 or 26



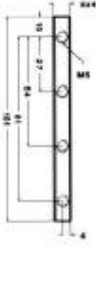
RC network for SEMIPACK 1 / 2 / 3

Dimensions in mm

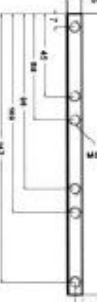
3x SEMIPACK 2



4x SEMIPACK 1



3x SEMIPACK 3



Mounting bars (to be inserted into the rails)

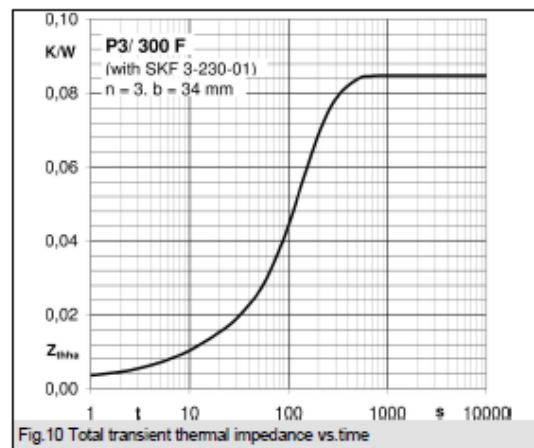
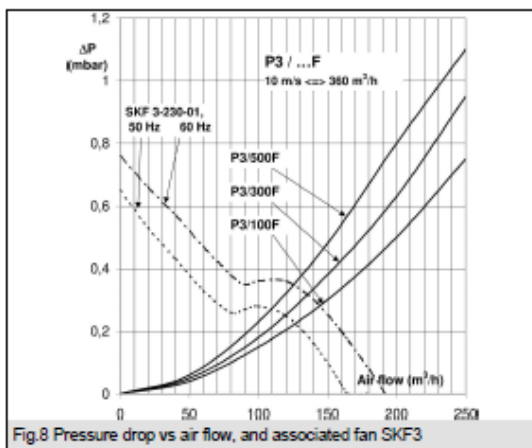
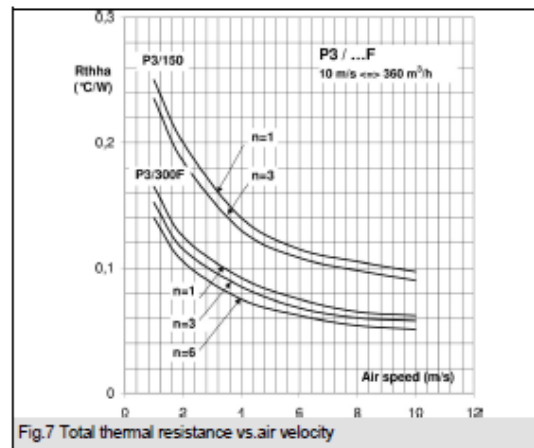
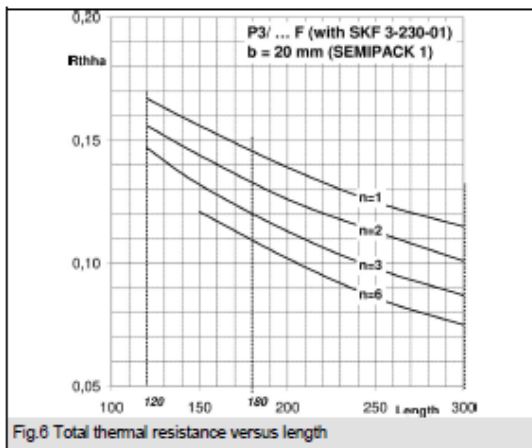
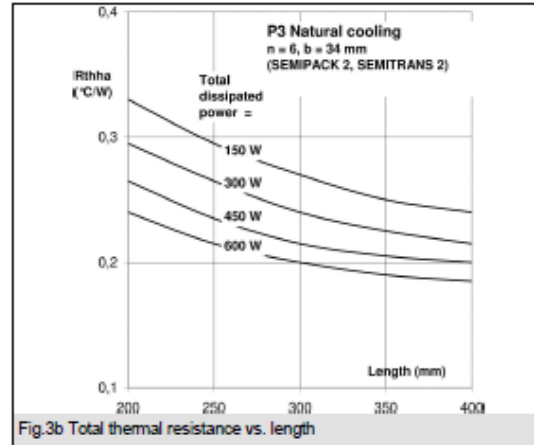
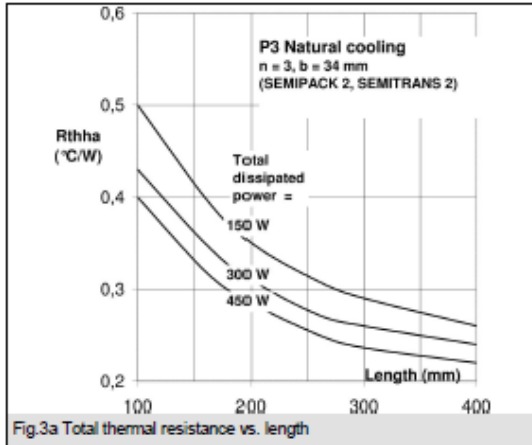
(Contact SEMIKRON for further details on the above accessories)

P 3 standard accessories

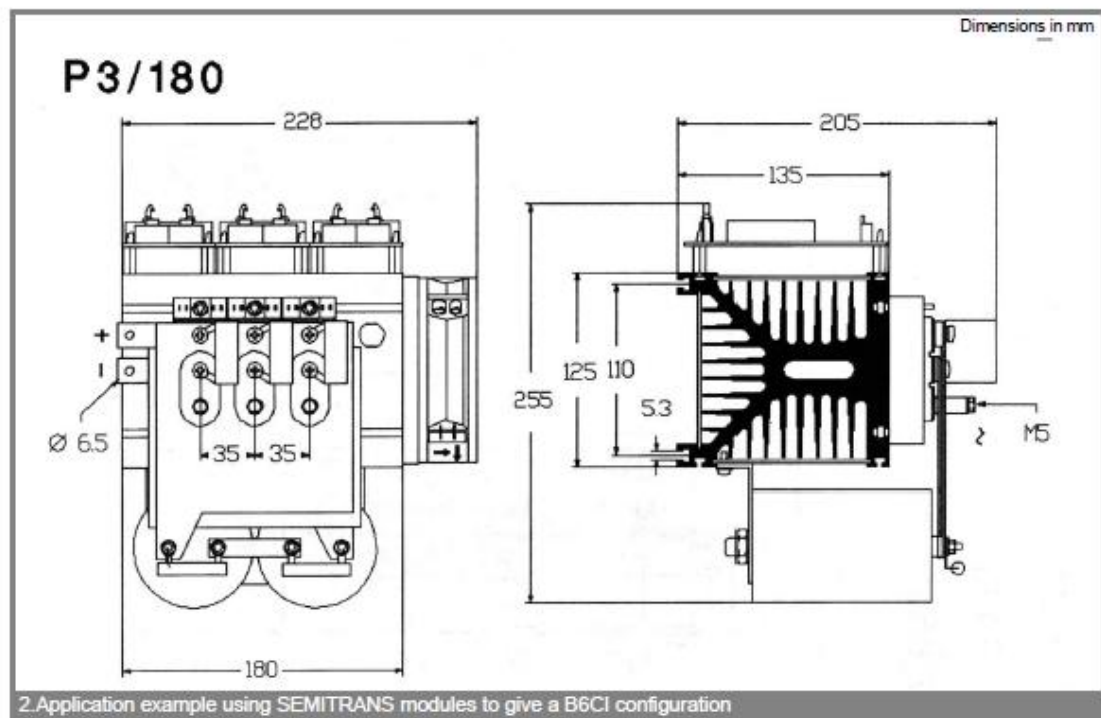
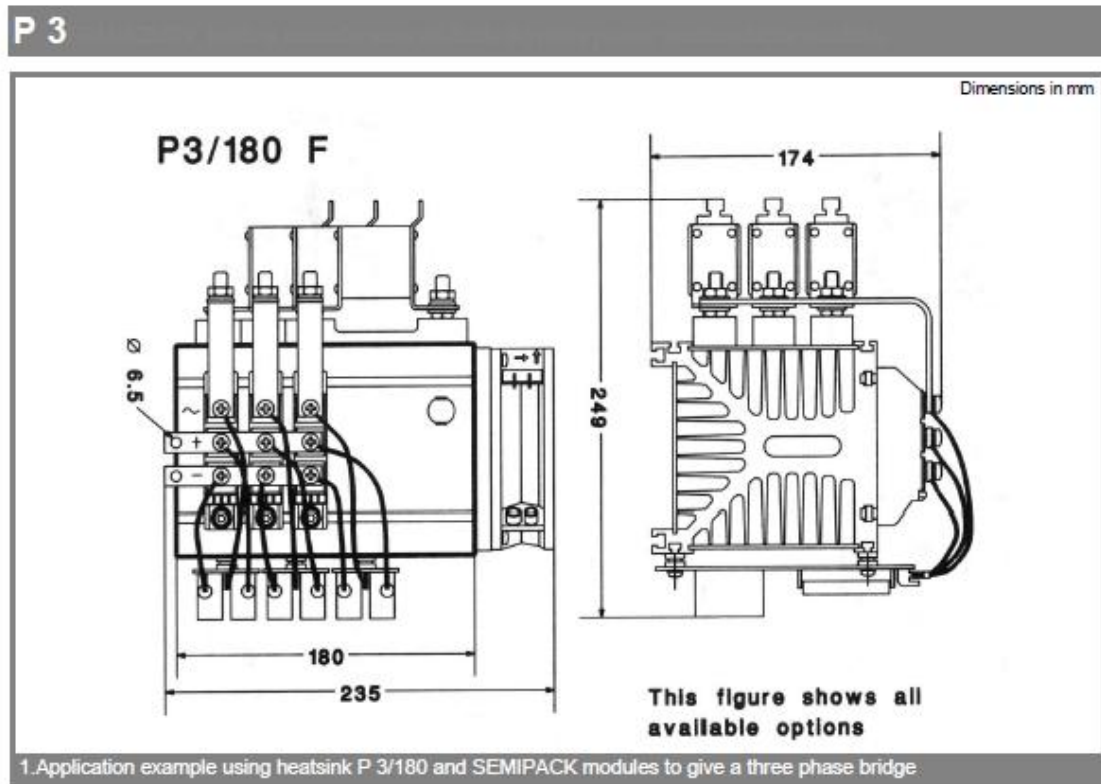
1
17-03-2005 ADR
© by SEMIKRON

Příloha č. 2: Katalogový list chladiče P 3 od firmy Semikron (2/3)

P 3




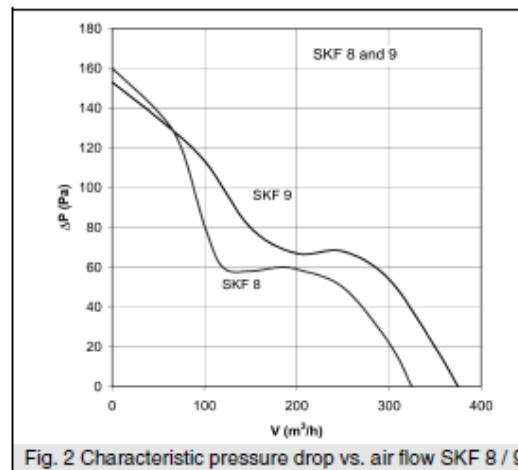
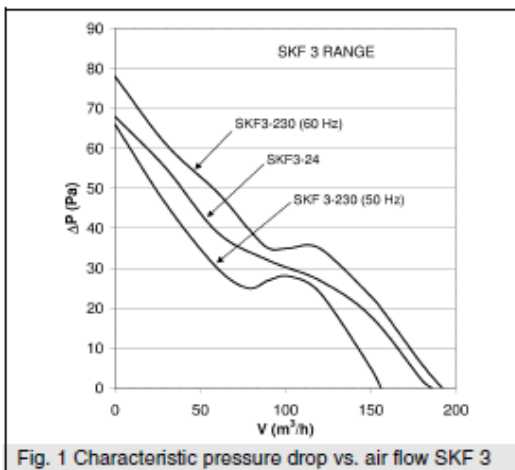
Příloha č. 2: Katalogový list chladiče P 3 od firmy Semikron (3/3)



Příloha č. 3: Katalogový list ventilátoru SKF 3-230-01 od firmy Semikron (1/2)

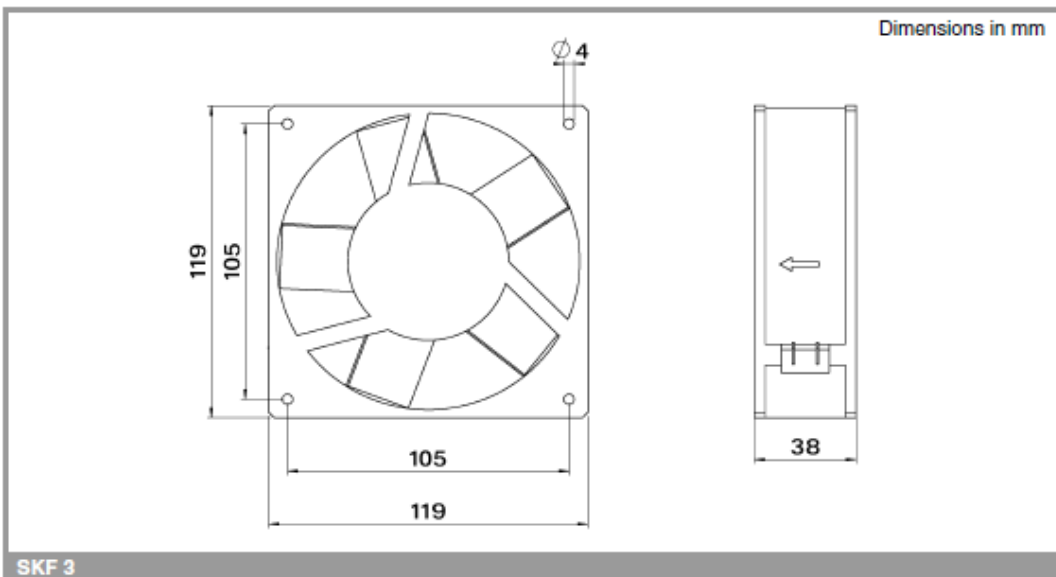
Axial Fans

Types	Ident No.		f Hz	V ₁ V	Max volume m ³ /h	P W	T _{amb} max °C	Weight kg	Noise dB
SKF 3-230-01	30031061		50 / 60	230	159 / 190	15 / 14	70	0,55	37 / 41
SKF 3-115-01	30031110		50 / 60	115	160 / 190	15,5 / 14,5	70	0,55	37 / 41
SKF 3-24c-01	VE001030		DC	24	185	7,5	70	0,26	43
SKF 8-230-01	30145431		50	230	325	45	50	1,1	48
SKF 9-230-01	30142395		50	230	375	24	70	1	54

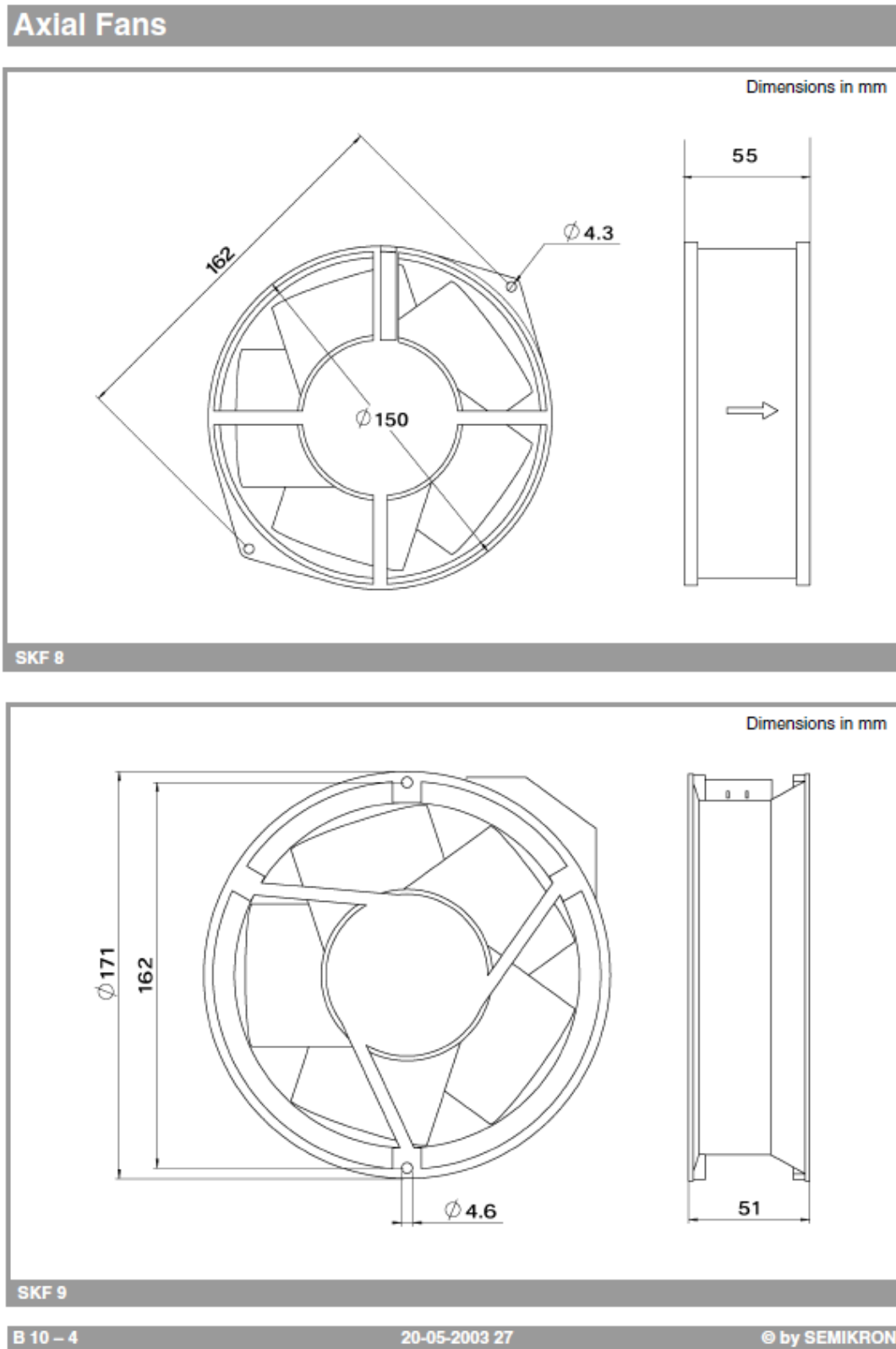


Features

- Can be used in both directions (extraction or blowing)
- Thermal contact protection (SKF 8 and SKF 9)
- Metal Casing



Příloha č. 3: Katalogový list ventilátoru SKF 3-230-01 od firmy Semikron (2/2)



Příloha č. 4: Katalogový list budicí soustavy PRISMIC A 50 od firmy Brush (1/4)



BRUSH TURBOGENERATORS



PRISMIC® A50 EXCITATION SYSTEM

Equipment supplied to over 130 countries
Over 120 years of electrical experience

Příloha č. 4: Katalogový list budicí soustavy PRISMIC A 50 od firmy Brush (2/4)



Part of PRISMIC® A50 excitation system for a 259MVA turbogenerator



PRISMIC® A50 excitation controller



A BRUSH excitation system utilising modular power converters for a 140MVA turbogenerator

Introduction

With many years experience gained manufacturing world-class excitation systems and generators, with output ratings up to 1000MW, BRUSH is able to provide superior systems incorporating the cCSAus approved PRISMIC® A50 excitation controller. The PRISMIC A50 excitation controller is designed, assembled and tested in compliance with CE directives.

BRUSH PRISMIC® A50 excitation systems provide both high performance and stable voltage regulation with high reliability using advanced microprocessor and software technologies.

BRUSH PRISMIC® A50 Turnkey Excitation Systems

BRUSH expertise is available to provide help with specification of system requirements right through manufacturing and factory testing of the equipment to support of on-site testing and putting the equipment into service. Factory testing can include testing of the actual system with a real-time power system simulator to ensure optimum stability settings.

Excitation systems are provided with most major components included within one or more suitable equipment cubicles or panels. Equipment and functionality provided typically includes the following components:

- Operator console for quick and easy adjustment of settings and modes.
- Customized logic to simplify the tasks of excitation system startup and shutdown.
- De-excitation and field suppression system to ensure satisfactory de-excitation for both operational and emergency shut down.
- Overvoltage protection / crowbar circuit to prevent excitation system damage in fault conditions.

BRUSH is able to provide additional separate auxiliary equipment such as excitation power supply transformers, circuit breakers for special applications such as electrical braking of hydro generators etc. as necessary to complete the excitation system.

Please discuss particular requirements with BRUSH sales personnel.

Flexibility of BRUSH PRISMIC® A50 Excitation Systems

Systems are available to satisfy most generator excitation current ratings from under 20A to over 7000A.

The high degree of flexibility afforded by the PRISMIC® A50 controller enables BRUSH to provide many different configurations to satisfy a wide range of generator excitation requirements for example:

- A50-S type static excitation systems, where fast response time is required. For these systems the PRISMIC A50 is equipped with a large controlled power bridge providing excitation current to the main generator field through sliprings. In these cases the PRISMIC A50 typically implements the IEEE421.5 model ST4B.
- A50-B type brushless excitation systems, where an a.c. excitation generator feeds through a rotating rectifier bridge to provide excitation current to the main generator field without the need for sliprings and brushes. In these cases the PRISMIC® A50 typically implements the IEEE421.5 model AC7B.
- A50-A type a.c. excitation systems where an a.c. excitation generator typically on the same shaft as the main generator provides the supply to the A50 power bridge which provides excitation current to the main generator via sliprings. The a.c. excitation generator may be provided with a dedicated PRISMIC® A50 controller to regulate the excitation system supply voltage.
- A50-D type d.c. excitation systems where an old d.c. excitation generator provides the excitation power supply. These systems are normally only provided for refurbishment projects.

Příloha č. 4: Katalogový list budicí soustavy PRISMIC A 50 od firmy Brush (3/4)



PRISMIC® A50 excitation system with a dual redundant control for a 90MVA turbogenerator

Dual Redundancy for Increased Integrity

Depending upon customer requirements various levels of redundancy can be provided. Typically for high integrity systems full dual redundant control units and dual redundant power converters are provided. The PRISMIC® A50 controller includes automatic follower functionality to ensure that transfer to standby is bumpless with no noticeable system disturbance.

Voltage Regulation and Other Modes of Operation

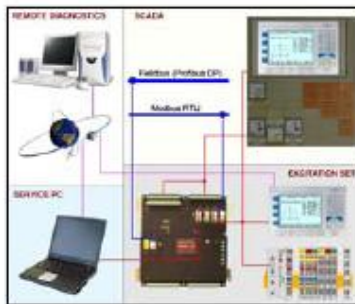
BRUSH PRISMIC® A50 systems provide voltage regulation to an accuracy of $\pm 0.25\%$ voltage regulation. When operating in interconnected mode, power factor or reactive power set point control is available.

Power factor or reactive power set point control is available when operating in interconnected mode. The flexibility of the PRISMIC® A50 controller enables any practical reactive current compensation setting to be programmed, including drooping voltage profile or line-drop compensation.

The PRISMIC® A50 control loop implements limiter functionality to override the primary control operating mode when necessary to ensure the generator operating point remains within allowable limits. The following limiter functionality is typically included:

- Under Excitation Limiter.
- Stator Current Limiter.
- Over Excitation (Rotor Current) Limiter.
- Over Flux (Under Frequency U/f ratio) Limiter.
- Terminal Voltage Limiter.
- Fast Acting Field Current Limiter.

For commissioning and maintenance work the PRISMIC® A50 includes a manual mode of operation where excitation current may be directly adjusted. Each PRISMIC® A50 system includes power system stabilizer functionality to enhance damping of power system oscillations by adjustment of excitation. The stabilizer may be specified as either type IEEE PSS2B or type IEEE PSS3B.

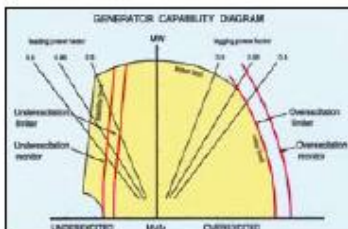


PRISMIC® A50 excitation system interfacing options

Optional Features

Many other optional features are available as follows:

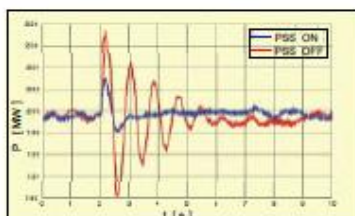
- Communication links to plant monitoring or prime mover control systems (DCS / SCADA systems) are available with PRISMIC® A50 systems using protocols such as Modbus, ProfibusDP, Modbus/TCP, Ethernet Global Data etc. Other protocols are available as required.
- Communication link to provide remote monitoring and site maintenance support by BRUSH engineering staff.
- Paralleling of the generator to the power system by means of PRISMIC® A50 built in synchroniser.



Generator capability diagram showing limiter settings

For static excitation systems the following optional features are available:

- Various configurations of field circuit breaker arrangement can be provided, for example an a.c. breaker on the supply side of the power converter and / or d.c. breaker on the output side of the power converter.
- Various field flashing options can be provided to utilize the customer's preferred power source to energize the generator field during start-up.
- Excitation power supply transformer can be provided.
- Dual redundant converter fans can be provided to give increased excitation system integrity at a lower cost than a dual redundant bridge.



Typical comparison of active power transient response with and without power system stabilizer enabled

BRUSH offers flexibility in implementation to ensure that customer's requirements are satisfied. Please contact BRUSH to discuss particular requirements.

Windows Human Machine Interface (HMI) Software

Software is included to enable commissioning using a Windows based PC. The software facilitates adjustment of stability settings, initiation of tests and downloading of response test data and display of detailed diagnostic data.

Příloha č. 4: Katalogový list budicí soustavy PRISMIC A 50 od firmy Brush (4/4)



PRISMIC® A50 PRODUCT DESIGNATION CODES

PRISMIC® A50 systems are provided in many configurations to suit particular applications. To help identify key facets of each particular system BRUSH use a designation code system in the following form: PRISMIC® A50-TC.RM. The characters T,C,R and M are replaced with the characters below according to the attributes of the particular system as shown.
Note: Other variations are available – please discuss with BRUSH if required.

T – Type of Excitation System

- S : Static excitation system
- B : Brushless excitation system
- A : Excitation system with a.c. exciter
- D : Excitation system with d.c. exciter

R – System Redundancy

- 1 : Single channel
- 2 : Twin channel converter and controller
- A : Twin channel controller with single converter

M – Mechanical Design

- C : Excitation cubicle with front access
- D : Excitation cubicle with front and rear access
- P : Plate mounted equipment
- R : 19inch rack mounted equipment

C – Power Converter

- IGBT : pulse width modulation H bridge converter
- B2C : single phase fully controlled thyristor bridge
- B3C : three phase fully controlled thyristor bridge
- I_{EN} : Nominal d.c. output current
- U_{LN} : Nominal line to line excitation supply voltage

- 0 : IGBT $I_{EN}=10A, U_{LN}=250V$
- 1 : B6C $I_{EN}=20A, U_{LN}=400V$
- 2 : B2C $I_{EN}=20A, U_{LN}=300V$
- 5 : B6C $I_{EN}=370A, U_{LN}=400V$
- 6 : B6C $I_{EN}=600A, U_{LN}=400V$
- 7 : B6C $I_{EN}=800A, U_{LN}=400V$
- A : B6C $I_{EN}=1500A, U_{LN}=800V$
- B : B6C $I_{EN}=2000A, U_{LN}=850V$
- C : B6C $I_{EN}=2800A, U_{LN}=860V$
- D : B6C $I_{EN}=4000A, U_{LN}=800V$
- E : B6C $I_{EN}=8000A, U_{LN}=800V$

SUMMARY OF PRISMIC® A50 FEATURES

- Stable and reliable operation
- Fast acting regulation with efficient damping
- Power system stabilizer included
- Voltage regulation accuracy +/-0.25%
- All necessary limiters included
- Dual redundancy option with bumpless transfer to standby channel
- Manual mode of operation available (exciter field current control mode) with bumpless transfer
- Field de-energizing in normal operation and fault conditions
- Conforms to CE directives, cCSAus approved
- Three phase or single phase sensing
- Customized sequence logic included for startup and shut-down
- Event recording for easy system monitoring
- Internal analog data recording for easy logging of response tests
- Cubicle mounted operator console available for easy diagnostics and mode selection etc.
- Communications interfaces available for data transfer to plant monitoring and control systems such as turbine controller, DCS or SCADA system
- Interfaces directly to BRUSH R10 equipment for monitoring of rotor earth fault status in brushless excitation systems.
- Optional synchronizer included with both main and check channels
- Rotating diode failure detection included for brushless generator applications
- Comprehensive factory testing always included to reduce on-site commissioning time

ADDITIONAL SERVICES FROM BRUSH

- BRUSH can provide expertise to help with system design and specification writing
- Where necessary testing using a real time power system simulation can be provided to optimize stability settings
- On site testing and commissioning is available by highly experienced BRUSH service engineers
- BRUSH can provide training of operators and maintenance staff both at the factory and on site
- Various protection equipment can be provided as required
- Generator auxiliary equipment can be provided such as neutral point connection and earthing equipment, etc.
- Generator terminal cubicles or bus ducts can be provided including instrument transformers, lightning/surge arrestors etc. to facilitate connection of generator terminals to system bus-bars



BRUSH ELECTRICAL MACHINES Ltd
 Falcon Works, Nottingham Road,
 Loughborough, Leics. LE11 1EX, England
 Tel: +44 (0)1509 611511
 Fax: +44 (0)1509 610440
 E-mail: salesuk@brush.eu
 Web: www.brush.eu

BRUSH HMA b.v.
 PO Box 3007, 2980 DA Ridderkerk
 The Netherlands
 Tel: +31 180 445500
 Fax: +31 180 445566
 Email: salesnl@brush.eu
 Web: www.brush.eu

BRUSH SEM s.r.o.
 Edvarda Benese 39, 301 00 Pízeň
 Czech Republic
 Tel: +420 37 8210111
 Fax: +420 37 8210214
 Email: salescz@brush.eu
 Web: www.brush.eu

BRUSH TURBOGENERATORS Inc.
 15110 Northwest Freeway, Suite 150,
 Houston, Texas 77040, USA
 Tel: +1 (281) 580 1314
 Fax: +1 (281) 580 5801
 Email: salesus@brush.eu
 Web: www.brush.eu